

**MINISTÉRIO DA DEFESA
EXÉRCITO BRASILEIRO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA NUCLEAR**

THIAGO FREITAS BELO

**PARAMETRIZAÇÃO DE SEÇÃO DE CHOQUE MACROSCÓPICA DE UM REATOR NUCLEAR
PWR PARA VÁRIOS REGIMES DE BURN-UP**

Rio de Janeiro

2015

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

THIAGO FREITAS BELO

**PARAMETRIZAÇÃO DE SEÇÃO DE CHOQUE MACROSCÓPICA DE UM
REATOR NUCLEAR PWR PARA VÁRIOS REGIMES DE BURN-UP**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Nuclear do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Nuclear.

Orientador: Prof. João Claudio Batista Fiel – D.Sc.

Rio de Janeiro

2015

C 2015

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

Praça General Tibúrcio, 80 – Praia Vermelha

Rio de Janeiro – RJ CEP: 22290-270

Este exemplar é propriedade do Instituto Militar de Engenharia, que poderá incluí-lo em base de dados, armazenar em computador, microfilmear ou adotar qualquer forma de arquivamento.

É permitida a menção, a reprodução parcial ou integral e a transmissão entre bibliotecas deste trabalho, sem modificação de seu texto, em qualquer meio que esteja ou venha a ser fixado, para pesquisa acadêmica, comentários e citações, desde que não tenha finalidade comercial e que seja feita a referência bibliográfica completa.

Os conceitos expressos neste trabalho são de responsabilidade do autor e do orientador.

621.483 Belo, Thiago Freitas.

B433p Parametrização da seção de choque macroscópica de um reator nuclear PWR para vários regimes de burn-up / Thiago Freitas Belo; orientado por João Claudio Batista Fiel. – Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2015.

306 p. : il

Dissertação (mestrado) – Instituto Militar de Engenharia – Rio de Janeiro, 2015.

1. Engenharia Nuclear – teses e dissertações 2. Energia nuclear. 3. Reator I. Fiel, João Claudio Batista II. Título. III. Instituto Militar de Engenharia.

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

THIAGO FREITAS BELO

**PARAMETRIZAÇÃO DE SEÇÃO DE CHOQUE MACROSCÓPICA DE UM
REATOR NUCLEAR PWR PARA VÁRIOS REGIMES DE BURN-UP**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Nuclear do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Nuclear.

Orientador: Prof. João Claudio Batista Fiel – D.Sc.

Aprovada em 13 de Fevereiro de 2015, pela seguinte Banca Examinadora:

Prof. João Claudio Batista Fiel – D.Sc. do IME – Presidente

Prof. Sergio de Oliveira Vellozo – D.Sc. do IME

Prof. Ronaldo Glicério Cabral – Ph.D. do IME

Prof. Fernando Carvalho da Silva – D.Sc. da UFRJ

Pesq. Maria da Conceição Michiyo Koide – D.Sc. da CNEN

Rio de Janeiro

2015

*À minha mãe, Miriam Cristina Quadro de Freitas,
meu porto seguro.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha mãe, Miriam Cristina Cuadro de Freitas, pelo exemplo, valores e amor em todos os meus anos de vida. Cada um de seus atos foi uma oportunidade que eu tive para crescer e me tornar o que sou.

À minha vó e meu vô, Cátia Cuadro e Jorge Freitas, por sempre acreditarem em mim e sempre estarem de braços abertos para qualquer coisa que precisei.

Aos meus irmãos, Diogo Leite e Rafael Feck, por todas as vezes que precisei acreditar em mim e continuar a estudar.

À minha namorada e antes de tudo amiga, Manoella Bueno, por todo apoio, compreensão e amor nas horas que mais precisei.

Aos professores, Dalton, Claudio e Marcos Paulo, pelo conhecimento que adquiri nesses dois anos de mestrado. Agradeço principalmente ao professor Sergio Vellozo, por sempre estar à disposição para qualquer dúvida, relacionada ou não ao trabalho, e pelo seu amor à ciência, que me fez cada vez buscar mais conhecimentos na área.

Aos meus queridos amigos do curso, Fagner Rother, Gabriel Fidalgo, Ilson Gradim, João Lúcio Mação e Olga Oliveira, quero agradecer os grandes momentos de alegria e também as maratonas de estudos, tão desgastantes, mas, tão necessárias para a nossa formação.

Ao Instituto Militar de Engenharia, pela oportunidade e incentivo a pesquisa, colocando a disposição o material necessário para que fosse possível essa realização.

A CAPES, pelo apoio financeiro.

Agradeço especialmente ao meu orientador, João Claudio Fiel, pela base necessária para o desenvolvimento do trabalho e pelo espírito crítico o qual espero, pelo menos em parte, ter adquirido.

“In order to succeed it is not necessary to be much cleverer than other people. All you have to do is be one day ahead of them.”

LEO SZILARD

SUMÁRIO

LISTAS DE ILUSTRAÇÕES	11
LISTA DE TABELAS	30
1 INTRODUÇÃO	36
1.1 Definição do Assunto da Dissertação	36
1.2 O Estado da Arte	37
1.3 Inserção da Metodologia Proposta	40
1.4 Descrição dos Capítulos	41
2 DEFINIÇÕES FUNDAMENTAIS	43
2.1 Introdução	43
2.2 Interação Do Neutron Com a Matéria.....	43
2.2.1 Captura	44
2.2.2 Fissão	44
2.2.3 Espalhamento.....	44
2.2.4 Seção de Choque.....	45
2.2.4.1 Seção de Choque Microscópica.....	46
2.2.4.2 Seção de Choque Macroscópica.....	48
2.2.5 Efeito da Temperatura na Interação dos Nêutrons	49
2.2.5.1 Efeito Doppler	49
2.3 Conceitos Básicos da Teoria de Transporte de Nêutrons	50
2.3.1 Taxa de Reação e Fluxo de Nêutrons	50
2.3.2 Equação de Transporte de Nêutrons	52
2.3.3 Equação de Difusão	55
2.3.4 Equação de Difusão Multigrupo.....	58
2.3.5 Equação de Difusão a Dois Grupos.....	61
2.4 Burn-Up	64
2.5 Produtos de Fissão	66
3 MÉTODO DE PARAMETRIZAÇÃO DAS SEÇÕES CHOQUE MACROSCÓPICAS .	68
3.1 Introdução	68
3.2 Polinômios de Tchebyshev	68
3.2.1 Definição.....	69
3.2.2 Propriedades	70
3.3 Parametrização das Seções de Choque.....	72
3.3.1 Cálculo dos Coeficientes da Expansão em Polinômios de Tchebyshev.....	72
3.3.2 Expansão em Polinômios de Tchebyshev.....	73
3.4 Parâmetros de Estado	74

4	OBTENÇÃO DAS SEÇÕES DE CHOQUE MACROSCÓPICAS	76
4.1	Introdução	76
4.2	O Código SCALE	76
4.2.1	KENO-VI	77
4.2.2	T6-DEPL	78
4.2.2.1	Regime de Burn-Up	78
4.2.3	T-NEWT.....	79
4.2.3.1	Cálculo de Homogeneização	80
4.2.3.2	Cálculo de Colapsoção	85
4.2.4	Diagrama do Processo de Obtenção das Seções de Choque Macroscópicas	87
4.3	Seções de Choque em Análise.....	88
4.4	Biblioteca de Dados Nucleares.....	89
4.4.1	Escolha da Biblioteca de Dados Nucleares.....	90
5	DESCRIÇÃO DOS ELEMENTOS COMBUSTÍVEIS TRATADOS	93
5.1	Introdução	93
5.2	Elemento Combustível Sem Veneno Queimável.....	93
5.3	Elemento Combustível Com Veneno Queimável	96
6	CÁLCULO PARA O ELEMENTO COMBUSTÍVEL SEM VENENO QUEIMÁVEL ...	99
6.1	Introdução	99
6.2	Ciclo Zero.....	99
6.2.1	Parametrização em Função da Temperatura do Combustível.....	100
6.2.2	Parametrização em Função da Temperatura e Densidade do Moderador	104
6.2.3	Parametrização em Função da Concentração de Boro Solúvel	107
6.2.4	Parametrização em Função do Enriquecimento de $^{235}_{92}\text{U}$	110
6.3	Ciclo 1	113
6.3.1	Parametrização em Função da Temperatura do Combustível.....	115
6.3.2	Parametrização em Função da Temperatura e Densidade do Moderador	118
6.3.3	Parametrização em Função da Concentração de Boro Solúvel	121
6.3.4	Parametrização em Função DO Enriquecimento de $^{235}_{92}\text{U}$	123
6.4	Ciclo 2	126
6.4.1	Parametrização em Função da Temperatura do Combustível.....	128
6.4.2	Parametrização em Função da Temperatura e Densidade do Moderador	131
6.4.3	Parametrização em Função da Concentração de Boro Solúvel	133
6.4.4	Parametrização em Função do Enriquecimento de $^{235}_{92}\text{U}$	136
6.5	Ciclo 3	139
6.5.1	Parametrização em Função da Temperatura do Combustível.....	141
6.5.2	Parametrização em Função da Temperatura e Densidade do Moderador	143
6.5.3	Parametrização em Função da Concentração de Boro Solúvel	146
6.5.4	Parametrização em Função do Enriquecimento de $^{235}_{92}\text{U}$	148

7	CÁLCULO PARA O ELEMENTO COMBUSTÍVEL COM VENENO QUEIMÁVEL.	152
7.1	Introdução	152
7.2	Ciclo Zero	153
7.2.1	Parametrização em Função da Temperatura do Combustível.....	153
7.2.2	Parametrização em Função da Temperatura e Densidade do Moderador	156
7.2.3	Parametrização em Função da Concentração de Boro Solúvel	159
7.2.4	Parametrização em Função do Enriquecimento de $^{235}_{92}\text{U}$	161
7.3	Ciclo 1	164
7.3.1	Parametrização em Função da Temperatura do Combustível.....	166
7.3.2	Parametrização em Função da Temperatura e Densidade do Moderador	168
7.3.3	Parametrização em Função da Concentração de Boro Solúvel	171
7.3.4	Parametrização em Função do Enriquecimento de $^{235}_{92}\text{U}$	173
7.4	Ciclo 2	176
7.4.1	Parametrização em Função da Temperatura do Combustível.....	178
7.4.2	Parametrização em Função da Temperatura e Densidade do Moderador	180
7.4.3	Parametrização em Função da Concentração de Boro Solúvel	183
7.4.4	Parametrização em Função do Enriquecimento de $^{235}_{92}\text{U}$	186
7.5	Ciclo 3	189
7.5.1	Parametrização em Função da Temperatura do Combustível.....	191
7.5.2	Parametrização em Função da Temperatura e Densidade do Moderador	193
7.5.3	Parametrização em Função da Concentração de Boro Solúvel	196
7.5.4	Parametrização em Função do Enriquecimento de $^{235}_{92}\text{U}$	199
8	OUTROS RESULTADOS	202
8.1	Introdução	202
8.2	Comparação Expansão X Cálculo Direto	202
8.3	Cálculo do Coeficiente de Reatividade de Temperatura.....	204
8.4	Cálculo do Fator de Fissão Rápido.....	207
8.5	Comparação entre o Método de Parametrização por Polinômios de Tchebyshev e por Polinômios de Lagrange	209
9	ANÁLISE FINAL E CONCLUSÃO	212
9.1	Conclusões e Análise Final.....	212
9.2	Sugestões para Futuros Projetos.....	213
10	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	214
11	APÊNDICES	217
11.1	Programa em Fortran para Cálculo dos Coeficientes de Tchebyshev.....	218
11.2	Estrutura dos Grupos de Energia	221
11.3	Gráficos Complementares para o Elemento Combustível Sem Veneno Queimável	225
11.3.1	Ciclo Zero.....	225
11.3.1.1	Parametrização em Função da Temperatura do Combustível.....	225

11.3.1.2	Parametrização em Função da Temperatura e Densidade do Moderador	228
11.3.1.3	Parametrização em Função da Concentração de Boro Solúvel	230
11.3.1.4	Parametrização em Função do Enriquecimento de $^{235}_{92}\text{U}$	233
11.3.2	Ciclo 1	235
11.3.2.1	Parametrização em Função da Temperatura do Combustível.....	235
11.3.2.2	Parametrização em Função da Temperatura e Densidade do Moderador	238
11.3.2.3	Parametrização em Função da Concentração de Boro Solúvel	240
11.3.2.4	Parametrização em Função do Enriquecimento de $^{235}_{92}\text{U}$	243
11.3.3	Ciclo 2	245
11.3.3.1	Parametrização em Função da Temperatura do Combustível.....	245
11.3.3.2	Parametrização em Função da Temperatura e Densidade do Moderador	248
11.3.3.3	Parametrização em Função da Concentração de Boro Solúvel	250
11.3.3.4	Parametrização em Função do Enriquecimento de $^{235}_{92}\text{U}$	253
11.3.4	Ciclo 3	255
11.3.4.1	Parametrização em Função da Temperatura do Combustível.....	255
11.3.4.2	Parametrização em Função da Temperatura e Densidade do Moderador	258
11.3.4.3	Parametrização em Função da Concentração de Boro Solúvel	260
11.3.4.4	Parametrização em Função do Enriquecimento de $^{235}_{92}\text{U}$	263
11.4	Gráficos Complementares para o Elemento Combustível Com Veneno Queimável	266
11.4.1	Ciclo Zero.....	266
11.4.1.1	Parametrização em Função da Temperatura do Combustível.....	266
11.4.1.2	Parametrização em Função da Temperatura e Densidade do Moderador	269
11.4.1.3	Parametrização em Função da Concentração de Boro Solúvel	271
11.4.1.4	Parametrização em Função do Enriquecimento de $^{235}_{92}\text{U}$	274
11.4.2	Ciclo 1	276
11.4.2.1	Parametrização em Função da Temperatura do Combustível.....	276
11.4.2.2	Parametrização em Função da Temperatura e Densidade do Moderador	279
11.4.2.3	Parametrização em Função da Concentração de Boro Solúvel	281
11.4.2.4	Parametrização em Função do Enriquecimento de $^{235}_{92}\text{U}$	284
11.4.3	Ciclo 2	286
11.4.3.1	Parametrização em Função da Temperatura do Combustível.....	286
11.4.3.2	Parametrização em Função da Temperatura e Densidade do Moderador	289
11.4.3.3	Parametrização em Função da Concentração de Boro Solúvel	291
11.4.3.4	Parametrização em Função do Enriquecimento de $^{235}_{92}\text{U}$	294
11.4.4	Ciclo 3	296
11.4.4.1	Parametrização em Função da Temperatura do Combustível.....	296
11.4.4.2	Parametrização em Função da Temperatura e Densidade do Moderador	299
11.4.4.3	Parametrização em Função da Concentração de Boro Solúvel	301
11.4.4.4	Parametrização em Função do Enriquecimento de $^{235}_{92}\text{U}$	304

LISTAS DE ILUSTRAÇÕES

FIG. 2.1 Feixe monoenergético de nêutrons incidindo em uma camada fina de material	47
FIG. 2.2 Diagrama hierárquico das seções de choque microscópicas.....	48
FIG. 2.3 Alargamento Doppler das ressonâncias com o aumento da temperatura.....	50
FIG. 2.4 Grupos de energia do nêutron	59
FIG. 2.5 Balanço de nêutrons considerando o grupo de energia.....	59
FIG. 2.6 Estrutura de energia a dois grupos de energia	62
FIG. 2.7 Produtos de fissão gerados na queima do combustível	65
FIG. 2.8 Distribuição dos produtos de fissão para o ^{235}U em função do número de massa	66
TAB. 4.1 Nuclídeos selecionados resultantes da queima do combustível.	79
FIG. 4.2 Tipos de homogeneização	81
FIG. 4.3 Geração das constantes de grupo das seções de choque macroscópicas.....	85
FIG. 4.4 Diagrama de blocos do processo de obtenção das seções de choque.	87
FIG. 4.5 Seções de choque em análise.	88
FIG. 5.1 Elemento combustível sem veneno queimável - Vista Superior.	94
FIG. 5.2 Elemento combustível sem veneno queimável - Vista 3D.....	95
FIG. 5.3 Elemento combustível com veneno queimável - Vista Superior.	97
FIG. 5.4 Elemento combustível com veneno queimável - Vista 3D.....	98
FIG. 6.1 Seção de choque de fissão do grupo rápido.	102
FIG. 6.2 Seção de choque de fissão do grupo térmico.	102
FIG. 6.3 Seção de choque de espalhamento do grupo rápido.	102
FIG. 6.4 Seção de choque de espalhamento do grupo térmico.	102
FIG. 6.5 Seção de choque de captura do grupo rápido	102
FIG. 6.6 Seção de choque de captura do grupo térmico.	102
FIG. 6.7 Fator de multiplicação em função da temperatura do combustível.	103
FIG. 6.8 Seção de choque de fissão do grupo rápido.	106
FIG. 6.9 Seção de choque de fissão do grupo térmico.	106
FIG. 6.10 Seção de choque de espalhamento do grupo rápido.	106
FIG. 6.11 Seção de choque de espalhamento do grupo térmico.	106

FIG. 6.12	Seção de choque de captura do grupo rápido.	106
FIG. 6.13	Seção de choque de captura do grupo térmico.	106
FIG. 6.14	Fator de multiplicação em função da temperatura do moderador.	107
FIG. 6.15	Seção de choque de fissão do grupo rápido.	109
FIG. 6.16	Seção de choque de fissão do grupo térmico.	109
FIG. 6.17	Seção de choque de espalhamento do grupo rápido.	109
FIG. 6.18	Seção de choque de espalhamento do grupo térmico.	109
FIG. 6.19	Seção de choque de captura do grupo rápido.	109
FIG. 6.20	Seção de choque de captura do grupo térmico.	109
FIG. 6.21	Fator de multiplicação em função da concentração de boro solúvel.	110
FIG. 6.22	Seção de choque de fissão do grupo rápido.	112
FIG. 6.23	Seção de choque de fissão do grupo térmico.	112
FIG. 6.24	Seção de choque de espalhamento do grupo rápido.	112
FIG. 6.25	Seção de choque de espalhamento do grupo térmico.	112
FIG. 6.26	Seção de choque de captura do grupo rápido.	112
FIG. 6.27	Seção de choque de captura do grupo térmico.	112
FIG. 6.28	Fator de multiplicação em função do enriquecimento de urânio.	113
FIG. 6.29	Seção de choque de fissão do grupo rápido.	117
FIG. 6.30	Seção de choque de fissão do grupo térmico.	117
FIG. 6.31	Seção de choque de espalhamento do grupo rápido.	117
FIG. 6.32	Seção de choque de espalhamento do grupo térmico.	117
FIG. 6.33	Seção de choque de captura do grupo rápido.	117
FIG. 6.34	Seção de choque de captura do grupo térmico.	117
FIG. 6.35	Fator de multiplicação em da temperatura do combustível.	118
FIG. 6.36	Seção de choque de fissão do grupo rápido.	120
FIG. 6.37	Seção de choque de fissão do grupo térmico.	120
FIG. 6.38	Seção de choque de espalhamento do grupo rápido.	120
FIG. 6.39	Seção de choque de espalhamento do grupo térmico.	120
FIG. 6.40	Seção de choque de captura do grupo rápido.	120
FIG. 6.41	Seção de choque de captura do grupo térmico.	120
FIG. 6.42	Fator de multiplicação em função da temperatura do moderador.	121
FIG. 6.43	Seção de choque de fissão do grupo rápido.	122

FIG. 6.44	Seção de choque de fissão do grupo térmico.	122
FIG. 6.45	Seção de choque de espalhamento do grupo rápido.	122
FIG. 6.46	Seção de choque de espalhamento do grupo térmico.	122
FIG. 6.47	Seção de choque de captura do grupo rápido.	123
FIG. 6.48	Seção de choque de captura do grupo térmico.	123
FIG. 6.49	Fator de multiplicação em função da concentração de boro solúvel.	123
FIG. 6.50	Seção de choque de fissão do grupo rápido.	125
FIG. 6.51	Seção de choque de fissão do grupo térmico.	125
FIG. 6.52	Seção de choque de espalhamento do grupo rápido.	125
FIG. 6.53	Seção de choque de espalhamento do grupo térmico.	125
FIG. 6.54	Seção de choque de captura do grupo rápido.	125
FIG. 6.55	Seção de choque de captura do grupo térmico.	125
FIG. 6.56	Fator de multiplicação em função do enriquecimento de urânio.	126
FIG. 6.57	Seção de choque de fissão do grupo rápido.	129
FIG. 6.58	Seção de choque de fissão do grupo térmico.	129
FIG. 6.59	Seção de choque de espalhamento do grupo rápido.	129
FIG. 6.60	Seção de choque de espalhamento do grupo térmico.	129
FIG. 6.61	Seção de choque de captura do grupo rápido.	130
FIG. 6.62	Seção de choque de captura do grupo térmico.	130
FIG. 6.63	Fator de multiplicação em função da temperatura do combustível.	130
FIG. 6.64	Seção de choque de fissão do grupo rápido.	132
FIG. 6.65	Seção de choque de fissão do grupo térmico.	132
FIG. 6.66	Seção de choque de espalhamento do grupo rápido.	132
FIG. 6.67	Seção de choque de espalhamento do grupo térmico.	132
FIG. 6.68	Seção de choque de captura do grupo rápido.	132
FIG. 6.69	Seção de choque de captura do grupo térmico.	132
FIG. 6.70	Fator de multiplicação em função da temperatura do moderador.	133
FIG. 6.71	Seção de choque de fissão do grupo rápido.	135
FIG. 6.72	Seção de choque de fissão do grupo térmico.	135
FIG. 6.73	Seção de choque de espalhamento do grupo rápido.	135
FIG. 6.74	Seção de choque de espalhamento do grupo térmico.	135
FIG. 6.75	Seção de choque de captura do grupo rápido.	135

FIG. 6.76	Seção de choque de captura do grupo térmico.....	135
FIG. 6.77	Fator de multiplicação em função da concentração de boro solúvel.....	136
FIG. 6.78	Seção de choque de fissão do grupo rápido.	138
FIG. 6.79	Seção de choque de fissão do grupo térmico.	138
FIG. 6.80	Seção de choque de espalhamento do grupo rápido.	138
FIG. 6.81	Seção de choque de espalhamento do grupo térmico.	138
FIG. 6.82	Seção de choque de captura do grupo rápido.	138
FIG. 6.83	Seção de choque de captura do grupo térmico.	138
FIG. 6.84	Fator de multiplicação em função do enriquecimento de urânio.	139
FIG. 6.85	Seção de choque de fissão do grupo rápido.	142
FIG. 6.86	Seção de choque de fissão do grupo térmico.	142
FIG. 6.87	Seção de choque de espalhamento do grupo rápido.	142
FIG. 6.88	Seção de choque de espalhamento do grupo térmico.	142
FIG. 6.89	Seção de choque de captura do grupo rápido.	142
FIG. 6.90	Seção de choque de captura do grupo térmico.	142
FIG. 6.91	Fator de multiplicação em função da temperatura do combustível.	143
FIG. 6.92	Seção de choque de fissão do grupo rápido.	144
FIG. 6.93	Seção de choque de fissão do grupo térmico.	144
FIG. 6.94	Seção de choque de espalhamento do grupo rápido.	145
FIG. 6.95	Seção de choque de espalhamento do grupo térmico.	145
FIG. 6.96	Seção de choque de captura do grupo rápido.	145
FIG. 6.97	Seção de choque de captura do grupo térmico.	145
FIG. 6.98	Fator de multiplicação em função da temperatura do moderador.....	145
FIG. 6.99	Seção de choque de fissão do grupo rápido.	147
FIG. 6.100	Seção de choque de fissão do grupo térmico.	147
FIG. 6.101	Seção de choque de espalhamento do grupo rápido.	147
FIG. 6.102	Seção de choque de espalhamento do grupo térmico.	147
FIG. 6.103	Seção de choque de captura do grupo rápido.	147
FIG. 6.104	Seção de choque de captura do grupo térmico.	147
FIG. 6.105	Fator de multiplicação em função da concentração de boro solúvel.....	148
FIG. 6.106	Seção de choque de fissão do grupo rápido.	150
FIG. 6.107	Seção de choque de fissão do grupo térmico.	150

FIG. 6.108	Seção de choque de espalhamento do grupo rápido.	150
FIG. 6.109	Seção de choque de espalhamento do grupo térmico.	150
FIG. 6.110	Seção de choque de captura do grupo rápido.	150
FIG. 6.111	Seção de choque de captura do grupo térmico.	150
FIG. 6.112	Fator de multiplicação em função do enriquecimento de urânio.	151
FIG. 7.1	Seção de choque de fissão do grupo rápido.	154
FIG. 7.2	Seção de choque de fissão do grupo térmico.	154
FIG. 7.3	Seção de choque de espalhamento do grupo rápido.	155
FIG. 7.4	Seção de choque de espalhamento do grupo térmico.	155
FIG. 7.5	Seção de choque de captura do grupo rápido.	155
FIG. 7.6	Seção de choque de captura do grupo térmico.	155
FIG. 7.7	Fator de multiplicação em função da temperatura do combustível.	155
FIG. 7.8	Seção de choque de fissão do grupo rápido.	157
FIG. 7.9	Seção de choque de fissão do grupo térmico.	157
FIG. 7.10	Seção de choque de espalhamento do grupo rápido.	158
FIG. 7.11	Seção de choque de espalhamento do grupo térmico.	158
FIG. 7.12	Seção de choque de captura do grupo rápido.	158
FIG. 7.13	Seção de choque de captura do grupo térmico.	158
FIG. 7.14	Fator de multiplicação em função da temperatura do moderador.	158
FIG. 7.15	Seção de choque de fissão do grupo rápido.	160
FIG. 7.16	Seção de choque de fissão do grupo térmico.	160
FIG. 7.17	Seção de choque de espalhamento do grupo rápido.	160
FIG. 7.18	Seção de choque de espalhamento do grupo térmico.	160
FIG. 7.19	Seção de choque de captura do grupo rápido.	161
FIG. 7.20	Seção de choque de captura do grupo térmico.	161
FIG. 7.21	Fator de multiplicação em função da concentração de boro solúvel.	161
FIG. 7.22	Seção de choque de fissão do grupo rápido.	163
FIG. 7.23	Seção de choque de fissão do grupo térmico.	163
FIG. 7.24	Seção de choque de espalhamento do grupo rápido.	163
FIG. 7.25	Seção de choque de espalhamento do grupo térmico.	163
FIG. 7.26	Seção de choque de captura do grupo rápido.	163
FIG. 7.27	Seção de choque de captura do grupo térmico.	163

FIG. 7.28 Fator de multiplicação em função do enriquecimento de urânio.	164
FIG. 7.29 Seção de choque de fissão do grupo rápido.	167
FIG. 7.30 Seção de choque de fissão do grupo térmico.	167
FIG. 7.31 Seção de choque de espalhamento do grupo rápido.	167
FIG. 7.32 Seção de choque de espalhamento do grupo térmico.	167
FIG. 7.33 Seção de choque de captura do grupo rápido.	168
FIG. 7.34 Seção de choque de captura do grupo térmico.	168
FIG. 7.35 Fator de multiplicação em função da temperatura do combustível.	168
FIG. 7.36 Seção de choque de fissão do grupo rápido.	170
FIG. 7.37 Seção de choque de fissão do grupo térmico.	170
FIG. 7.38 Seção de choque de espalhamento do grupo rápido.	170
FIG. 7.39 Seção de choque de espalhamento do grupo térmico.	170
FIG. 7.40 Seção de choque de captura do grupo rápido.	170
FIG. 7.41 Seção de choque de captura do grupo térmico.	170
FIG. 7.42 Fator de multiplicação em função da temperatura do moderador.	171
FIG. 7.43 Seção de choque de fissão do grupo rápido.	172
FIG. 7.44 Seção de choque de fissão do grupo térmico.	172
FIG. 7.45 Seção de choque de espalhamento do grupo rápido.	172
FIG. 7.46 Seção de choque de espalhamento do grupo térmico.	172
FIG. 7.47 Seção de choque de captura do grupo rápido.	173
FIG. 7.48 Seção de choque de captura do grupo térmico.	173
FIG. 7.49 Fator de multiplicação em função da concentração de boro solúvel.	173
FIG. 7.50 Seção de choque de fissão do grupo rápido.	175
FIG. 7.51 Seção de choque de fissão do grupo térmico.	175
FIG. 7.52 Seção de choque de espalhamento do grupo rápido.	175
FIG. 7.53 Seção de choque de espalhamento do grupo térmico.	175
FIG. 7.54 Seção de choque de captura do grupo rápido.	175
FIG. 7.55 Seção de choque de captura do grupo térmico.	175
FIG. 7.56 Fator de multiplicação em função do enriquecimento de urânio.	176
FIG. 7.57 Seção de choque de fissão do grupo rápido.	179
FIG. 7.58 Seção de choque de fissão do grupo térmico.	179
FIG. 7.59 Seção de choque de espalhamento do grupo rápido.	179

FIG. 7.60	Seção de choque de espalhamento do grupo térmico.	179
FIG. 7.61	Seção de choque de captura do grupo rápido.	179
FIG. 7.62	Seção de choque de captura do grupo térmico.	179
FIG. 7.63	Fator de multiplicação em função da temperatura do combustível.	180
FIG. 7.64	Seção de choque de fissão do grupo rápido.	182
FIG. 7.65	Seção de choque de fissão do grupo térmico.	182
FIG. 7.66	Seção de choque de espalhamento do grupo rápido.	182
FIG. 7.67	Seção de choque de espalhamento do grupo térmico.	182
FIG. 7.68	Seção de choque de captura do grupo rápido.	182
FIG. 7.69	Seção de choque de captura do grupo térmico.	182
FIG. 7.70	Fator de multiplicação em função da temperatura do moderador.	183
FIG. 7.71	Seção de choque de fissão do grupo rápido.	185
FIG. 7.72	Seção de choque de fissão do grupo térmico.	185
FIG. 7.73	Seção de choque de espalhamento do grupo rápido.	185
FIG. 7.74	Seção de choque de espalhamento do grupo térmico.	185
FIG. 7.75	Seção de choque de captura do grupo rápido.	185
FIG. 7.76	Seção de choque de captura do grupo térmico.	185
FIG. 7.77	Fator de multiplicação em função da concentração de boro solúvel.	186
FIG. 7.78	Seção de choque de fissão do grupo rápido.	188
FIG. 7.79	Seção de choque de fissão do grupo térmico.	188
FIG. 7.80	Seção de choque de espalhamento do grupo rápido.	188
FIG. 7.81	Seção de choque de espalhamento do grupo térmico.	188
FIG. 7.82	Seção de choque de captura do grupo rápido.	188
FIG. 7.83	Seção de choque de captura do grupo térmico.	188
FIG. 7.84	Fator de multiplicação em função do enriquecimento de urânio.	189
FIG. 7.85	Seção de choque de fissão do grupo rápido.	192
FIG. 7.86	Seção de choque de fissão do grupo térmico.	192
FIG. 7.87	Seção de choque de espalhamento do grupo rápido.	192
FIG. 7.88	Seção de choque de espalhamento do grupo térmico.	192
FIG. 7.89	Seção de choque de captura do grupo rápido.	193
FIG. 7.90	Seção de choque de captura do grupo térmico.	193
FIG. 7.91	Fator de multiplicação em função da temperatura do combustível.	193

FIG. 7.92	Seção de choque de fissão do grupo rápido.	195
FIG. 7.93	Seção de choque de fissão do grupo térmico.	195
FIG. 7.94	Seção de choque de espalhamento do grupo rápido.	195
FIG. 7.95	Seção de choque de espalhamento do grupo térmico.	195
FIG. 7.96	Seção de choque de captura do grupo rápido.	195
FIG. 7.97	Seção de choque de captura do grupo térmico.	195
FIG. 7.98	Fator de multiplicação em função da temperatura do moderador.	196
FIG. 7.99	Seção de choque de fissão do grupo rápido.	197
FIG. 7.100	Seção de choque de fissão do grupo térmico.	197
FIG. 7.101	Seção de choque de espalhamento do grupo rápido.	198
FIG. 7.102	Seção de choque de espalhamento do grupo térmico.	198
FIG. 7.103	Seção de choque de captura do grupo rápido.	198
FIG. 7.104	Seção de choque de captura do grupo térmico.	198
FIG. 7.105	Fator de multiplicação em função da concentração de boro solúvel.	199
FIG. 7.106	Seção de choque de fissão do grupo rápido.	200
FIG. 7.107	Seção de choque de fissão do grupo térmico.	200
FIG. 7.108	Seção de choque de espalhamento do grupo rápido.	201
FIG. 7.109	Seção de choque de espalhamento do grupo térmico.	201
FIG. 7.110	Seção de choque de captura do grupo rápido.	201
FIG. 7.111	Seção de choque de captura do grupo térmico.	201
FIG. 7.112	Fator de multiplicação em função do enriquecimento de urânio.	201
FIG. 11.1	Seção de choque total do grupo rápido.	225
FIG. 11.2	Seção de choque total do grupo térmico.	225
FIG. 11.3	Seção de choque de espalhamento 1-1.	226
FIG. 11.4	Seção de choque de espalhamento 1-2.	226
FIG. 11.5	Seção de choque de espalhamento 2-2.	226
FIG. 11.6	Seção de choque de absorção rápida.	226
FIG. 11.7	Seção de choque de absorção térmica.	226
FIG. 11.8	Seção de choque de nu-fissão rápido.	227
FIG. 11.9	Seção de choque de nu-fissão térmico.	227
FIG. 11.10	Seção de choque de transporte rápido.	227
FIG. 11.11	Seção de choque de transporte térmico.	227

FIG. 11.12	Seção de choque total rápido.	228
FIG. 11.13	Seção de choque total do grupo térmico.....	228
FIG. 11.14	Seção de choque de espalhamento 1-1.	228
FIG. 11.15	Seção de choque de espalhamento 1-2.	228
FIG. 11.16	Seção de choque de espalhamento 2-2.	229
FIG. 11.17	Seção de choque de absorção rápida.	229
FIG. 11.18	Seção de choque de absorção térmica.	229
FIG. 11.19	Seção de choque de nu-fissão rápido.	229
FIG. 11.20	Seção de choque de nu-fissão térmico.	229
FIG. 11.21	Seção de choque de transporte rápido.....	230
FIG. 11.22	Seção de choque de transporte térmico.....	230
FIG. 11.23	Seção de choque total rápido.	230
FIG. 11.24	Seção de choque total do grupo térmico.....	230
FIG. 11.25	Seção de choque de espalhamento 1-1.	231
FIG. 11.26	Seção de choque de espalhamento 1-2.	231
FIG. 11.27	Seção de choque de espalhamento 2-2.	231
FIG. 11.28	Seção de choque de absorção rápida.	231
FIG. 11.29	Seção de choque de absorção térmica.	231
FIG. 11.30	Seção de choque de nu-fissão rápido.	232
FIG. 11.31	Seção de choque de nu-fissão térmico.	232
FIG. 11.32	Seção de choque de transporte rápido.....	232
FIG. 11.33	Seção de choque de transporte térmico.....	232
FIG. 11.34	Seção de choque total rápido.	233
FIG. 11.35	Seção de choque total do grupo térmico.....	233
FIG. 11.36	Seção de choque de espalhamento 1-1.	233
FIG. 11.37	Seção de choque de espalhamento 1-2.	233
FIG. 11.38	Seção de choque de espalhamento 2-2.	234
FIG. 11.39	Seção de choque de absorção rápida.	234
FIG. 11.40	Seção de choque de absorção térmica.	234
FIG. 11.41	Seção de choque de nu-fissão rápido.	234
FIG. 11.42	Seção de choque de nu-fissão térmico.	234
FIG. 11.43	Seção de choque de transporte rápido.....	235

FIG. 11.44	Seção de choque de transporte térmico.....	235
FIG. 11.45	Seção de choque total do grupo rápido.....	235
FIG. 11.46	Seção de choque total do grupo térmico.....	235
FIG. 11.47	Seção de choque de espalhamento 1-1.....	236
FIG. 11.48	Seção de choque de espalhamento 1-2.....	236
FIG. 11.49	Seção de choque de espalhamento 2-2.....	236
FIG. 11.50	Seção de choque de absorção rápida.....	236
FIG. 11.51	Seção de choque de absorção térmica.....	236
FIG. 11.52	Seção de choque de nu-fissão rápido.....	237
FIG. 11.53	Seção de choque de nu-fissão térmico.....	237
FIG. 11.54	Seção de choque de transporte rápido.....	237
FIG. 11.55	Seção de choque de transporte térmico.....	237
FIG. 11.56	Seção de choque total rápido.....	238
FIG. 11.57	Seção de choque total do grupo térmico.....	238
FIG. 11.58	Seção de choque de espalhamento 1-1.....	238
FIG. 11.59	Seção de choque de espalhamento 1-2.....	238
FIG. 11.60	Seção de choque de espalhamento 2-2.....	239
FIG. 11.61	Seção de choque de absorção rápida.....	239
FIG. 11.62	Seção de choque de absorção térmica.....	239
FIG. 11.63	Seção de choque de nu-fissão rápido.....	239
FIG. 11.64	Seção de choque de nu-fissão térmico.....	239
FIG. 11.65	Seção de choque de transporte rápido.....	240
FIG. 11.66	Seção de choque de transporte térmico.....	240
FIG. 11.67	Seção de choque total rápido.....	240
FIG. 11.68	Seção de choque total do grupo térmico.....	240
FIG. 11.69	Seção de choque de espalhamento 1-1.....	241
FIG. 11.70	Seção de choque de espalhamento 1-2.....	241
FIG. 11.71	Seção de choque de espalhamento 2-2.....	241
FIG. 11.72	Seção de choque de absorção rápida.....	241
FIG. 11.73	Seção de choque de absorção térmica.....	241
FIG. 11.74	Seção de choque de nu-fissão rápido.....	242
FIG. 11.75	Seção de choque de nu-fissão térmico.....	242

FIG. 11.76	Seção de choque de transporte rápido.....	242
FIG. 11.77	Seção de choque de transporte térmico.....	242
FIG. 11.78	Seção de choque total rápido.	243
FIG. 11.79	Seção de choque total do grupo térmico.....	243
FIG. 11.80	Seção de choque de espalhamento 1-1.	243
FIG. 11.81	Seção de choque de espalhamento 1-2.	243
FIG. 11.82	Seção de choque de espalhamento 2-2.	244
FIG. 11.83	Seção de choque de absorção rápida.	244
FIG. 11.84	Seção de choque de absorção térmica.	244
FIG. 11.85	Seção de choque de nu-fissão rápido.	244
FIG. 11.86	Seção de choque de nu-fissão térmico.	244
FIG. 11.87	Seção de choque de transporte rápido.....	245
FIG. 11.88	Seção de choque de transporte térmico.....	245
FIG. 11.89	Seção de choque total do grupo rápido.....	245
FIG. 11.90	Seção de choque total do grupo térmico.....	245
FIG. 11.91	Seção de choque de espalhamento 1-1.	246
FIG. 11.92	Seção de choque de espalhamento 1-2.	246
FIG. 11.93	Seção de choque de espalhamento 2-2.	246
FIG. 11.94	Seção de choque de absorção rápida.	246
FIG. 11.95	Seção de choque de absorção térmica.	246
FIG. 11.96	Seção de choque de nu-fissão rápido.	247
FIG. 11.97	Seção de choque de nu-fissão térmico.	247
FIG. 11.98	Seção de choque de transporte rápido.....	247
FIG. 11.99	Seção de choque de transporte térmico.....	247
FIG. 11.100	Seção de choque total rápido.	248
FIG. 11.101	Seção de choque total do grupo térmico.....	248
FIG. 11.102	Seção de choque de espalhamento 1-1.	248
FIG. 11.103	Seção de choque de espalhamento 1-2.	248
FIG. 11.104	Seção de choque de espalhamento 2-2.	249
FIG. 11.105	Seção de choque de absorção rápida.	249
FIG. 11.106	Seção de choque de absorção térmica.	249
FIG. 11.107	Seção de choque de nu-fissão rápido.	249

FIG. 11.108	Seção de choque de nu-fissão térmico.	249
FIG. 11.109	Seção de choque de transporte rápido.	250
FIG. 11.110	Seção de choque de transporte térmico.	250
FIG. 11.111	Seção de choque total rápido.	250
FIG. 11.112	Seção de choque total do grupo térmico.	250
FIG. 11.113	Seção de choque de espalhamento 1-1.	251
FIG. 11.114	Seção de choque de espalhamento 1-2.	251
FIG. 11.115	Seção de choque de espalhamento 2-2.	251
FIG. 11.116	Seção de choque de absorção rápida.	251
FIG. 11.117	Seção de choque de absorção térmica.	251
FIG. 11.118	Seção de choque de nu-fissão rápido.	252
FIG. 11.119	Seção de choque de nu-fissão térmico.	252
FIG. 11.120	Seção de choque de transporte rápido.	252
FIG. 11.121	Seção de choque de transporte térmico.	252
FIG. 11.122	Seção de choque total rápido.	253
FIG. 11.123	Seção de choque total do grupo térmico.	253
FIG. 11.124	Seção de choque de espalhamento 1-1.	253
FIG. 11.125	Seção de choque de espalhamento 1-2.	253
FIG. 11.126	Seção de choque de espalhamento 2-2.	254
FIG. 11.127	Seção de choque de absorção rápida.	254
FIG. 11.128	Seção de choque de absorção térmica.	254
FIG. 11.129	Seção de choque de nu-fissão rápido.	254
FIG. 11.130	Seção de choque de nu-fissão térmico.	254
FIG. 11.131	Seção de choque de transporte rápido.	255
FIG. 11.132	Seção de choque de transporte térmico.	255
FIG. 11.133	Seção de choque total do grupo rápido.	255
FIG. 11.134	Seção de choque total do grupo térmico.	255
FIG. 11.135	Seção de choque de espalhamento 1-1.	256
FIG. 11.136	Seção de choque de espalhamento 1-2.	256
FIG. 11.137	Seção de choque de espalhamento 2-2.	256
FIG. 11.138	Seção de choque de absorção rápida.	256
FIG. 11.139	Seção de choque de absorção térmica.	256

FIG. 11.140	Seção de choque de nu-fissão rápido.	257
FIG. 11.141	Seção de choque de nu-fissão térmico.	257
FIG. 11.142	Seção de choque de transporte rápido.	257
FIG. 11.143	Seção de choque de transporte térmico.	257
FIG. 11.144	Seção de choque total rápido.	258
FIG. 11.145	Seção de choque total térmico.	258
FIG. 11.146	Seção de choque de espalhamento 1-1.	258
FIG. 11.147	Seção de choque de espalhamento 1-2.	258
FIG. 11.148	Seção de choque de espalhamento 2-2.	259
FIG. 11.149	Seção de choque de absorção rápida.	259
FIG. 11.150	Seção de choque de absorção térmica.	259
FIG. 11.151	Seção de choque de nu-fissão rápido.	259
FIG. 11.152	Seção de choque de nu-fissão térmico.	259
FIG. 11.153	Seção de choque de transporte rápido.	260
FIG. 11.154	Seção de choque de transporte térmico.	260
FIG. 11.155	Seção de choque total rápido.	260
FIG. 11.156	Seção de choque total térmico.	260
FIG. 11.157	Seção de choque de espalhamento 1-1.	261
FIG. 11.158	Seção de choque de espalhamento 1-2.	261
FIG. 11.159	Seção de choque de espalhamento 2-2.	261
FIG. 11.160	Seção de choque de absorção rápida.	261
FIG. 11.161	Seção de choque de absorção térmica.	261
FIG. 11.162	Seção de choque de nu-fissão rápido.	262
FIG. 11.163	Seção de choque de nu-fissão térmico.	262
FIG. 11.164	Seção de choque de transporte rápido.	262
FIG. 11.165	Seção de choque de transporte térmico.	262
FIG. 11.166	Seção de choque total rápido.	263
FIG. 11.167	Seção de choque total térmico.	263
FIG. 11.168	Seção de choque de espalhamento 1-1.	263
FIG. 11.169	Seção de choque de espalhamento 1-2.	263
FIG. 11.170	Seção de choque de espalhamento 2-2.	264
FIG. 11.171	Seção de choque de absorção rápida.	264

FIG. 11.172	Seção de choque de absorção térmica.	264
FIG. 11.173	Seção de choque de nu-fissão rápido.	264
FIG. 11.174	Seção de choque de nu-fissão térmico.	264
FIG. 11.175	Seção de choque de transporte rápido.	265
FIG. 11.176	Seção de choque de transporte térmico.	265
FIG. 11.177	Seção de choque total rápido.	266
FIG. 11.178	Seção de choque total térmico.	266
FIG. 11.179	Seção de choque de espalhamento 1-1.	267
FIG. 11.180	Seção de choque de espalhamento 1-2.	267
FIG. 11.181	Seção de choque de espalhamento 2-2.	267
FIG. 11.182	Seção de choque de absorção rápida.	267
FIG. 11.183	Seção de choque de absorção térmica.	267
FIG. 11.184	Seção de choque de nu-fissão rápido.	268
FIG. 11.185	Seção de choque de nu-fissão térmico.	268
FIG. 11.186	Seção de choque de transporte rápido.	268
FIG. 11.187	Seção de choque de transporte térmico.	268
FIG. 11.188	Seção de choque total rápido.	269
FIG. 11.189	Seção de choque total térmico.	269
FIG. 11.190	Seção de choque de espalhamento 1-1.	269
FIG. 11.191	Seção de choque de espalhamento 1-2.	269
FIG. 11.192	Seção de choque de espalhamento 2-2.	270
FIG. 11.193	Seção de choque de absorção rápida.	270
FIG. 11.194	Seção de choque de absorção térmica.	270
FIG. 11.195	Seção de choque de nu-fissão rápido.	270
FIG. 11.196	Seção de choque de nu-fissão térmico.	270
FIG. 11.197	Seção de choque de transporte rápido.	271
FIG. 11.198	Seção de choque de transporte térmico.	271
FIG. 11.199	Seção de choque total rápido.	271
FIG. 11.200	Seção de choque total térmico.	271
FIG. 11.201	Seção de choque de espalhamento 1-1.	272
FIG. 11.202	Seção de choque de espalhamento 1-2.	272
FIG. 11.203	Seção de choque de espalhamento 2-2.	272

FIG. 11.204	Seção de choque de absorção rápida.	272
FIG. 11.205	Seção de choque de absorção térmica.	272
FIG. 11.206	Seção de choque de nu-fissão rápido.	273
FIG. 11.207	Seção de choque de nu-fissão térmico.	273
FIG. 11.208	Seção de choque de transporte rápido.	273
FIG. 11.209	Seção de choque de transporte térmico.	273
FIG. 11.210	Seção de choque total rápido.	274
FIG. 11.211	Seção de choque total térmico.	274
FIG. 11.212	Seção de choque de espalhamento 1-1.	274
FIG. 11.213	Seção de choque de espalhamento 1-2.	274
FIG. 11.214	Seção de choque de espalhamento 2-2.	275
FIG. 11.215	Seção de choque de absorção rápida.	275
FIG. 11.216	Seção de choque de absorção térmica.	275
FIG. 11.217	Seção de choque de nu-fissão rápido.	275
FIG. 11.218	Seção de choque de nu-fissão térmico.	275
FIG. 11.219	Seção de choque de transporte rápido.	276
FIG. 11.220	Seção de choque de transporte térmico.	276
FIG. 11.221	Seção de choque total rápido.	276
FIG. 11.222	Seção de choque total térmico.	276
FIG. 11.223	Seção de choque de espalhamento 1-1.	277
FIG. 11.224	Seção de choque de espalhamento 1-2.	277
FIG. 11.225	Seção de choque de espalhamento 2-2.	277
FIG. 11.226	Seção de choque de absorção rápida.	277
FIG. 11.227	Seção de choque de absorção térmica.	277
FIG. 11.228	Seção de choque de nu-fissão rápido.	278
FIG. 11.229	Seção de choque de nu-fissão térmico.	278
FIG. 11.230	Seção de choque de transporte rápido.	278
FIG. 11.231	Seção de choque de transporte térmico.	278
FIG. 11.232	Seção de choque total rápido.	279
FIG. 11.233	Seção de choque total térmico.	279
FIG. 11.234	Seção de choque de espalhamento 1-1.	279
FIG. 11.235	Seção de choque de espalhamento 1-2.	279

FIG. 11.236	Seção de choque de espalhamento 2-2.	280
FIG. 11.237	Seção de choque de absorção rápida.	280
FIG. 11.238	Seção de choque de absorção térmica.	280
FIG. 11.239	Seção de choque de nu-fissão rápido.	280
FIG. 11.240	Seção de choque de nu-fissão térmico.	280
FIG. 11.241	Seção de choque de transporte rápido.	281
FIG. 11.242	Seção de choque de transporte térmico.	281
FIG. 11.243	Seção de choque total rápido.	281
FIG. 11.244	Seção de choque total térmico.	281
FIG. 11.245	Seção de choque de espalhamento 1-1.	282
FIG. 11.246	Seção de choque de espalhamento 1-2.	282
FIG. 11.247	Seção de choque de espalhamento 2-2.	282
FIG. 11.248	Seção de choque de absorção rápida.	282
FIG. 11.249	Seção de choque de absorção térmica.	282
FIG. 11.250	Seção de choque de nu-fissão rápido.	283
FIG. 11.251	Seção de choque de nu-fissão térmico.	283
FIG. 11.252	Seção de choque de transporte rápido.	283
FIG. 11.253	Seção de choque de transporte térmico.	283
FIG. 11.254	Seção de choque total rápido.	284
FIG. 11.255	Seção de choque total térmico.	284
FIG. 11.256	Seção de choque de espalhamento 1-1.	284
FIG. 11.257	Seção de choque de espalhamento 1-2.	284
FIG. 11.258	Seção de choque de espalhamento 2-2.	285
FIG. 11.259	Seção de choque de absorção rápida.	285
FIG. 11.260	Seção de choque de absorção térmica.	285
FIG. 11.261	Seção de choque de nu-fissão rápido.	285
FIG. 11.262	Seção de choque de nu-fissão térmico.	285
FIG. 11.263	Seção de choque de transporte rápido.	286
FIG. 11.264	Seção de choque de transporte térmico.	286
FIG. 11.265	Seção de choque total rápido.	286
FIG. 11.266	Seção de choque total térmico.	286
FIG. 11.267	Seção de choque de espalhamento 1-1.	287

FIG. 11.268	Seção de choque de espalhamento 1-2.	287
FIG. 11.269	Seção de choque de espalhamento 2-2.	287
FIG. 11.270	Seção de choque de absorção rápida.	287
FIG. 11.271	Seção de choque de absorção térmica.	287
FIG. 11.272	Seção de choque de nu-fissão rápido.	288
FIG. 11.273	Seção de choque de nu-fissão térmico.	288
FIG. 11.274	Seção de choque de transporte rápido.	288
FIG. 11.275	Seção de choque de transporte térmico.	288
FIG. 11.276	Seção de choque total rápido.	289
FIG. 11.277	Seção de choque total térmico.	289
FIG. 11.278	Seção de choque de espalhamento 1-1.	289
FIG. 11.279	Seção de choque de espalhamento 1-2.	289
FIG. 11.280	Seção de choque de espalhamento 2-2.	290
FIG. 11.281	Seção de choque de absorção rápida.	290
FIG. 11.282	Seção de choque de absorção térmica.	290
FIG. 11.283	Seção de choque de nu-fissão rápido.	290
FIG. 11.284	Seção de choque de nu-fissão térmico.	290
FIG. 11.285	Seção de choque de transporte rápido.	291
FIG. 11.286	Seção de choque de transporte térmico.	291
FIG. 11.287	Seção de choque total rápido.	291
FIG. 11.288	Seção de choque total térmico.	291
FIG. 11.289	Seção de choque de espalhamento 1-1.	292
FIG. 11.290	Seção de choque de espalhamento 1-2.	292
FIG. 11.291	Seção de choque de espalhamento 2-2.	292
FIG. 11.292	Seção de choque de absorção rápida.	292
FIG. 11.293	Seção de choque de absorção térmica.	292
FIG. 11.294	Seção de choque de nu-fissão rápido.	293
FIG. 11.295	Seção de choque de nu-fissão térmico.	293
FIG. 11.296	Seção de choque de transporte rápido.	293
FIG. 11.297	Seção de choque de transporte térmico.	293
FIG. 11.298	Seção de choque total rápido.	294
FIG. 11.299	Seção de choque total térmico.	294

FIG. 11.300	Seção de choque de espalhamento 1-1.	294
FIG. 11.301	Seção de choque de espalhamento 1-2.	294
FIG. 11.302	Seção de choque de espalhamento 2-2.	295
FIG. 11.303	Seção de choque de absorção rápida.	295
FIG. 11.304	Seção de choque de absorção térmica.	295
FIG. 11.305	Seção de choque de nu-fissão rápido.	295
FIG. 11.306	Seção de choque de nu-fissão térmico.	295
FIG. 11.307	Seção de choque de transporte rápido.	296
FIG. 11.308	Seção de choque de transporte térmico.	296
FIG. 11.309	Seção de choque total rápido.	296
FIG. 11.310	Seção de choque total térmico.	296
FIG. 11.311	Seção de choque de espalhamento 1-1.	297
FIG. 11.312	Seção de choque de espalhamento 1-2.	297
FIG. 11.313	Seção de choque de espalhamento 2-2.	297
FIG. 11.314	Seção de choque de absorção rápida.	297
FIG. 11.315	Seção de choque de absorção térmica.	297
FIG. 11.316	Seção de choque de nu-fissão rápido.	298
FIG. 11.317	Seção de choque de nu-fissão térmico.	298
FIG. 11.318	Seção de choque de transporte rápido.	298
FIG. 11.319	Seção de choque de transporte térmico.	298
FIG. 11.320	Seção de choque total rápido.	299
FIG. 11.321	Seção de choque total térmico.	299
FIG. 11.322	Seção de choque de espalhamento 1-1.	299
FIG. 11.323	Seção de choque de espalhamento 1-2.	299
FIG. 11.324	Seção de choque de espalhamento 2-2.	300
FIG. 11.325	Seção de choque de absorção rápida.	300
FIG. 11.326	Seção de choque de absorção térmica.	300
FIG. 11.327	Seção de choque de nu-fissão rápido.	300
FIG. 11.328	Seção de choque de nu-fissão térmico.	300
FIG. 11.329	Seção de choque de transporte rápido.	301
FIG. 11.330	Seção de choque de transporte térmico.	301
FIG. 11.331	Seção de choque total rápido.	301

FIG. 11.332	Seção de choque total térmico.	301
FIG. 11.333	Seção de choque de espalhamento 1-1.	302
FIG. 11.334	Seção de choque de espalhamento 1-2.	302
FIG. 11.335	Seção de choque de espalhamento 2-2.	302
FIG. 11.336	Seção de choque de absorção rápida.	302
FIG. 11.337	Seção de choque de absorção térmica.	302
FIG. 11.338	Seção de choque de nu-fissão rápido.	303
FIG. 11.339	Seção de choque de nu-fissão térmico.	303
FIG. 11.340	Seção de choque de transporte rápido.	303
FIG. 11.341	Seção de choque de transporte térmico.	303
FIG. 11.342	Seção de choque total rápido.	304
FIG. 11.343	Seção de choque total térmico.	304
FIG. 11.344	Seção de choque de espalhamento 1-1.	304
FIG. 11.345	Seção de choque de espalhamento 1-2.	304
FIG. 11.346	Seção de choque de espalhamento 2-2.	305
FIG. 11.347	Seção de choque de absorção rápida.	305
FIG. 11.348	Seção de choque de absorção térmica.	305
FIG. 11.349	Seção de choque de nu-fissão rápido.	305
FIG. 11.350	Seção de choque de nu-fissão térmico.	305
FIG. 11.351	Seção de choque de transporte rápido.	306
FIG. 11.352	Seção de choque de transporte térmico.	306

LISTA DE TABELAS

TAB. 3.1	Parâmetros de análise.....	75
TAB. 3.2	Valores de referência.	75
TAB. 4.2	Comparação entre as bibliotecas v7-238 e ce_v7_endf para o EC sem veneno queimável.	91
TAB. 4.3	Comparação entre as bibliotecas v7-238 e ce_v7_endf para o EC com veneno queimável.	91
TAB. 4.4	Funções de ponderação padrão para o processamento de dados multigrupo.	92
TAB. 6.1	Seções de choque em função da temperatura do combustível em um EC sem veneno queimável para o reator fresco.	100
TAB. 6.2	Seções de choque em função da temperatura e densidade do moderador em um EC sem veneno queimável para o reator fresco.	105
TAB. 6.3	Seções de choque em função da concentração de boro solúvel em um EC sem veneno queimável para o reator fresco.	108
TAB. 6.4	Seções de choque em função da concentração do enriquecimento de urânio em um EC sem veneno queimável para o reator fresco.	111
TAB. 6.5	Composições isotópicas dos núclídeos no primeiro ciclo de queima em um EC sem veneno queimável.....	114
TAB. 6.6	Seções de choque em função da temperatura do combustível em um EC sem veneno queimável no primeiro ciclo de queima.	116
TAB. 6.7	Seções de choque em função da temperatura e densidade do moderador em um EC sem veneno queimável no primeiro ciclo de queima.	119
TAB. 6.8	Seções de choque em função da concentração de boro solúvel em um EC sem veneno queimável no primeiro ciclo de queima.	121
TAB. 6.9	Seções de choque em função da concentração do enriquecimento de urânio em um EC sem veneno queimável no primeiro ciclo de queima.	124
TAB. 6.10	Composições isotópicas dos núclídeos no segundo ciclo de queima em um EC sem veneno queimável.....	127
TAB. 6.11	Seções de choque em função da temperatura do combustível em um EC sem veneno queimável no segundo ciclo de queima.	128

TAB. 6.12 Seções de choque em função da temperatura e densidade do moderador em um EC sem veneno queimável no segundo ciclo de queima.	131
TAB. 6.13 Seções de choque em função da concentração de boro solúvel em um EC sem veneno queimável no segundo ciclo de queima.	134
TAB. 6.14 Seções de choque em função da concentração do enriquecimento de urânio em um EC sem veneno queimável no segundo ciclo de queima.	137
TAB. 6.15 Composições isotópicas dos núclídeos no terceiro ciclo de queima em um EC sem veneno queimável.....	140
TAB. 6.16 Seções de choque em função da temperatura do combustível em um EC sem veneno queimável no terceiro ciclo de queima.	141
TAB. 6.17 Seções de choque em função da temperatura e densidade do moderador em um EC sem veneno queimável no terceiro ciclo de queima.	143
TAB. 6.18 Seções de choque em função da concentração de boro solúvel em um EC sem veneno queimável no terceiro ciclo de queima.	146
TAB. 6.19 Seções de choque em função da concentração do enriquecimento de urânio em um EC sem veneno queimável no terceiro ciclo de queima.	149
TAB. 7.1 Seções de choque em função da temperatura do combustível em um EC com veneno queimável para o reator fresco.	153
TAB. 7.2 Seções de choque em função da temperatura e densidade do moderador em um EC com veneno queimável para o reator fresco.	156
TAB. 7.3 Seções de choque em função da concentração de boro solúvel em um EC com veneno queimável para o reator fresco.	159
TAB. 7.4 Seções de choque em função da concentração do enriquecimento de urânio em um EC com veneno queimável para o reator fresco.	162
TAB. 7.5 Composições isotópicas dos núclídeos no primeiro ciclo de queima em um EC com veneno queimável.	165
TAB. 7.6 Seções de choque em função da temperatura do combustível em um EC com veneno queimável no primeiro ciclo de queima.	166
TAB. 7.7 Seções de choque em função da temperatura e densidade do moderador em um EC com veneno queimável no primeiro ciclo de queima.....	169
TAB. 7.8 Seções de choque em função da concentração de boro solúvel em um EC com veneno queimável no primeiro ciclo de queima.	171

TAB. 7.9	Seções de choque em função da concentração do enriquecimento de urânio em um EC com veneno queimável no primeiro ciclo de queima.....	174
TAB. 7.10	Composições isotópicas dos nuclídeos no segundo ciclo de queima em um EC com veneno queimável.	177
TAB. 7.11	Seções de choque em função da temperatura do combustível em um EC com veneno queimável no segundo ciclo de queima.	178
TAB. 7.12	Seções de choque em função da temperatura e densidade do moderador em um EC com veneno queimável no segundo ciclo de queima.....	181
TAB. 7.13	Seções de choque em função da concentração de boro solúvel em um EC com veneno queimável no segundo ciclo de queima.	184
TAB. 7.14	Seções de choque em função da concentração do enriquecimento de urânio em um EC com veneno queimável no segundo ciclo de queima.....	186
TAB. 7.15	Composições isotópicas dos nuclídeos no terceiro ciclo de queima em um EC com veneno queimável.	190
TAB. 7.16	Seções de choque em função da temperatura do combustível em um EC com veneno queimável no terceiro ciclo de queima.	191
TAB. 7.17	Seções de choque em função da temperatura e densidade do moderador em um EC com veneno queimável no terceiro ciclo de queima.	194
TAB. 7.18	Seções de choque em função da concentração de boro solúvel em um EC com veneno queimável no terceiro ciclo de queima.	196
TAB. 7.19	Seções de choque em função da concentração do enriquecimento de urânio em um EC com veneno queimável no terceiro ciclo de queima.....	199
TAB. 8.1	Comparação entre o resultado obtido a partir do código SCALE e pela expansão dos polinômios de Tchebyshev em função da temperatura do combustível de 1248 K em um elemento combustível sem veneno queimável.	203
TAB. 8.2	Comparação entre o resultado obtido a partir do código SCALE e pela expansão dos polinômios de Tchebyshev em função da temperatura do moderador de 450 K em um elemento combustível com veneno queimável.....	204
TAB. 8.3	Coeficiente de reatividade de temperatura do combustível e comparação entre as reatividades obtidas a partir do código SCALE e pela expansão dos polinômios de Tchebyshev em função das temperaturas do combustível de $T_1=590$ K e $T_2=600$ K em um elemento combustível com veneno queimável, no ciclo zero.....	206

TAB. 8.4	Coeficiente de reatividade de temperatura do combustível e comparação entre as reatividades obtidas a partir do código SCALE e pela expansão dos polinômios de Tchebyshev em função das temperaturas do combustível de $T_1=590$ K e $T_2=600$ K em um elemento combustível com veneno queimável, no ciclo três.	207
TAB. 8.5	Coeficiente de reatividade de temperatura do combustível em unidades de $pcm / ^\circ K$	207
TAB. 8.6	Comparação entre os resultados dos fatores de fissão rápida obtidos a partir do código SCALE e pela expansão dos polinômios de Tchebyshev em função das temperaturas de $T_1=590$ K e $T_2=600$ K em um elemento combustível com veneno queimável.	209
TAB. 8.7	– Análise do método de Tchebyshev e de Lagrange em comparação com os resultados obtidos a partir do código SCALE em função da temperatura do combustível de 1248 K em um elemento combustível com veneno queimável.	211

RESUMO

A análise do núcleo de um reator PWR envolve a modelagem neurônica, e os cálculos exigem dados nucleares gerados a poucos grupos de energia, tais como, as seções de choque de nêutrons, que dependem da composição material e do elemento combustível, bem como os parâmetros termo-hidráulicos. Os métodos utilizados para obter estas seções de choque, nos cálculos do reator, geralmente utilizam códigos de computador nucleares que requerem um grande tempo de processamento e de memória computacional, tornando o processo computacionalmente muito caro. Para proporcionar os dados de seções de choque de forma rápida e segura, sem a dependência de sistemas de cálculos complexos, este trabalho desenvolveu um conjunto de parâmetros de seções de choque com base nos polinômios Tchebyshev, ajustando as seções de choque como uma função dos parâmetros nucleares, que incluem temperatura do combustível, temperatura e densidade do moderador, concentração de boro solúvel, enriquecimento do U-235, e o burn-up. Neste estudo são avaliadas as seções de choque de fissão, espalhamento, total, nu-fissão, captura, transporte e absorção para um elemento combustível de um reator PWR, com e sem veneno queimável, considerando-se vários ciclos de queima e a influência dos produtos de fissão no comportamento das mesmas. As análises foram realizadas com o código SCALE 6.1, mais especificamente, o módulo de Monte Carlo KENO-VI, a sequência de depleção TRITON (T6-DEPL), e o módulo de transporte (T-NEWT). Os resultados da comparação dos dados obtidos no código, e os parâmetros de projeto, como o coeficiente de reatividade de temperatura e o fator de fissão rápido, em relação às expansões polinomiais desenvolvidas, apresentaram excelentes aproximações. As diferenças entre o método de parametrização e o cálculo direto são inferiores a 0,03 %. Uma vantagem importante da metodologia desenvolvida é que uma vez que os dados de seção de choque foram parametrizados eles podem ser armazenados e facilmente usados em dispositivos de informática muito simples para cálculos rápidos. Embora a metodologia tenha sido derivada para um reator PWR, o método pode ser facilmente estendido para outros tipos de reatores.

ABSTRACT

Nuclear reactor core analysis involves neutronic modeling, and the calculations require problem dependent nuclear data generated with few neutron energy groups, as for instance the neutron cross-sections, which depend on the fuel element material composition as well as the thermal hydraulic parameters. The methods used to obtain these problem-dependent cross-sections, in the reactor calculations, generally uses nuclear computer codes that require a large processing time and computational memory, making the process computationally very expensive. To provide the cross-sections of rapidly and safely, without the dependence of complex systems calculations, this work developed a set of parameterized cross-sections based on the Tchebyshev polynomials by fitting the cross sections as a function of nuclear parameters, which include fuel temperature, moderator temperature and density, soluble boron concentration, U-235 enrichment, and the burn-up. In this study is evaluated the dependent problem about fission, scattering, total, nu-fission, capture, transport and absorption cross-sections for a typical PWR fuel element reactor with 12 integrated burnable absorber fuel rods, considering several burn-up cycles and the influence of the fission products in the cross sections behavior. The analyses were carried out with the SCALE 6.1 code package, more specifically, the Monte Carlo code KENO-VI, the TRITON depletion sequence (T6-DEPL), and NEWT transport code (T-NEWT). The results of comparison with direct calculations with the SCALE code system and also the test using project parameters, such as the temperature coefficient of reactivity and fast fission factor, show excellent agreements. The differences between the cross-section parameterization methodology and the direct calculations based on the SCALE code system are less than 0.03 percent. An important advantage of the cross-section parameterization methodology is that once the cross-section data have been parameterized they can be stored and easily used in very simple computer devices for fast calculations. Although the methodology has been derived for a particular reactor configuration the method can be easily extended for other reactor configurations.

1 INTRODUÇÃO

1.1 DEFINIÇÃO DO ASSUNTO DA DISSERTAÇÃO

O projeto de um reator nuclear é baseado na interação de diversas variáveis. Essas variáveis incluem a natureza do combustível e do moderador, composições e geometria do núcleo, e remoção do calor que é gerado principalmente por fissão e em parte por decaimento radioativo. Uma parte essencial do design do reator é a especificação do núcleo, uma vez que este determina o comportamento do nêutron no sistema e, portanto, as condições de criticalidade (GLASSTONE E SESONSKE, 1994). Os cálculos neutrônicos são baseados na teoria de transporte e na teoria da difusão, os quais podem ser executados por métodos determinísticos ou probabilísticos (Monte Carlo).

Em geral, os cálculos neutrônicos em um reator nuclear requerem dados nucleares gerados a poucos grupos de energia, como por exemplo, as seções de choque dos nêutrons, que dependem da composição do material, das células presentes no elemento combustível, dos parâmetros termo-hidráulicos, bem como os parâmetros nucleares. Estes parâmetros nucleares são chamados de variáveis de estado, que incluem a temperatura do combustível, a temperatura do moderador, a densidade do moderador, a concentração de boro solúvel e o burn-up, ou seja, a queima do combustível (BOKOV, 2009). A queima do combustível faz com que haja uma mudança na composição do núcleo a cada ciclo, visto que, ao longo dos ciclos de queima, os isótopos físeis vão sendo consumidos, resultando na produção de actínídeos e produtos de fissão.

Para resolver numericamente a equação de transporte por meio de equações algébricas em um computador, as variáveis de direção, posição, energia e tempo devem ser discretizadas. As variáveis de energia são tipicamente discretizadas pelo método multi-grupo, onde cada grupo de energia representa uma energia constante. Para reatores térmicos, o método a dois grupos é suficiente para resolver os cálculos

neurônicos, onde é considerado um grupo rápido e um grupo térmico de energia.

A geração das constantes a dois grupos para se determinar as seções de choque de fissão, absorção, espalhamento e remoção, assim como o coeficiente de difusão para cada região do núcleo, é um dos aspectos mais complexos e importantes na análise de um reator nuclear. Para calcular as constantes de grupo, uma grande variedade de dados é necessária, como por exemplo, a temperatura do combustível e do moderador, utilizadas na geração das integrais de ressonância do alargamento Doppler e dos espectros térmicos, a densidade do moderador para uma determinada região e a composição do núcleo. Todas essas informações, juntamente com a biblioteca de seções de choque microscópicas e a homogeneização adequada das células, são utilizadas para determinar os espectros rápidos e térmicos e assim calcular as constantes macroscópicas a dois grupos.

Os métodos utilizados para obter estes valores de seções de choque nos cálculos de um reator, geralmente requerem códigos computacionais nucleares que necessitam de um grande tempo de processamento e de memória computacional, tornando o processo computacionalmente caro. Devido à relevância destes dados nucleares, novos métodos têm sido estudados com o propósito de buscar procedimentos alternativos para fornecer os valores de seções de choque de forma rápida e segura, sem a dependência de sistemas complexos de cálculos.

Portanto, este trabalho tem por objetivo, a obtenção e análise das seções de choque macroscópicas, em função de parâmetros de estado em um sistema definido, considerando os ciclos de queima do combustível.

1.2 O ESTADO DA ARTE

Os cálculos neurônicos em um reator nuclear requerem seções de choque homogeneizadas a poucos grupos de energia para uma célula ou um elemento combustível, em função da composição dos materiais, parâmetros termo-hidráulicos e dos parâmetros de estado. Ao longo dos anos, métodos de parametrização das seções de choque a poucos grupos de energia utilizando processos matemáticos, tais como

regressão *STEPWISE*, regressão *QUASI* e métodos *SPARSE GRIDS*, incluindo controle de erros pela redução do número de termos de aproximação e do número de parâmetros de estado, assim como, a aproximação por uma função suave foram sugeridos e elaborados. Com o intuito de complementar e atualizar a revisão bibliográfica, até o presente momento, será apresentado um pequeno retrospecto dos métodos de parametrização concebidos aplicados à seção de choque.

Foi proposto em 2005 por Zimin e Semenov (ZIMIN E SEMENOV, 2005), um procedimento combinado de interpolação e aproximação para descrever as dependências das seções de choque de nêutrons a poucos grupos de energia em função do burn-up e de parâmetros termo-hidráulicos de uma célula de combustível. A seção de choque é escrita como uma soma de dois termos: a seção de choque de base que é interpolada por uma spline cúbica, que depende apenas do burn-up e é calculado de acordo com as condições nominais do núcleo do reator, e o desvio, o que depende das variáveis termo-hidráulicas e do burn-up da célula. As dependências multidimensionais do desvio são aproximadas pelo polinômio, que é realizado por uma seleção de melhor ajuste dos termos polinomiais usando o algoritmo de regressão *STEPWISE*.

Em 2009, Bokov (BOKOV, 2009) utilizou a técnica de regressão *QUASI* para criar uma metodologia consistente e flexível para parametrização das seções de choque do nêutron a poucos grupos de energia, permitindo a criação de uma ferramenta automatizada para essa parametrização. A metodologia da regressão *QUASI* inclui a aproximação por uma função suave de um número arbitrário de dimensões, incorporação e caracterização da aproximação do erro e otimização da biblioteca incluindo o controle de erros pela redução do número de termos de aproximação e número dos parâmetros de estado.

Em 2009, Prinsloo, Bokov, Stander e Botes (PRINSLOO, et al. 2005) apresentaram o método de parametrização polinomial das seções de choque baseado na técnica de *SPARSE GRIDS*, aplicada a diferentes casos de placas *MTR* (Material Test Reactor), como combustível *HEU* e combustível *LEU*, sendo o último contendo venenos queimáveis. A metodologia é comparada aos métodos mais tradicionais de parametrizações. O método inclui um controle integrado de erro, tratamento e avaliação coerente da importância de todos os parâmetros do estado (incluindo burn-

up), e identificação e aproximação de todas as dependências de seção de choque (incluindo termos cruzados). O método também utiliza uma técnica conhecida como análise de variância (ANOVA) para construir o modelo de integração *SPARSE GRIDS* eficiente para determinar os coeficientes da expansão.

Em 2011, uma interpolação multilinear hierárquica baseada nos nós da técnica *SPARSE GRIDS* foi utilizada para a representação da seção de choque homogeneizada a poucos grupos por Botes e Bokov (BOTES E BOKOV, 2011). Além da própria interpolação, o método inclui um meio de estimar o erro de interpolação integrado e um procedimento para otimizar a representação das seções de choque homogeneizadas. O método foi testado em seções de choque de captura em elemento combustível MTR padrão para diferentes isótopos, e os resultados foram comparados com uma interpolação multilinear em um produto tensorial de malhas. Foi demonstrado que as seções de choque podem ser interpoladas com a precisão necessária utilizando a técnica de *SPARSE GRIDS*, o que exige um número significativamente menor de pontos quando comparado com a técnica do produto tensorial de malhas.

A interpolação realizada em uma técnica *SPARSE GRIDS* multidimensional, construído a partir dos nós de Tchebyshev, utilizada por Bokov e Botes em 2012 (BOKOV E BOTES, 2012), foi usada para apresentar um método para representar as seções de choque homogeneizadas a poucos grupos de energia em uma célula VVER. A vantagem desta representação é que ele combina o rigor de interpolação Tchebyshev com a eficiência do método *SPARSE GRIDS*.

Em 2013, Fiel (FIEL, 2013) desenvolveu, por meio dos polinômios de Tchebyshev, uma representação parametrizada das seções de choque macroscópicas homogeneizadas para um elemento combustível PWR, com e sem veneno queimável, em função da temperatura do combustível, da temperatura moderador, da concentração de boro solúvel, da densidade do moderador e do enriquecimento do $^{235}_{92}\text{U}$. Este estudo avaliou as seções de choque de fissão, espalhamento, total, nu-fissão, captura, transporte e absorção para a condição de ciclo zero, ou seja, para o reator fresco.

Ao longo dos anos, vários pesquisadores ao redor do mundo têm introduzido diferentes técnicas de parametrização da seção de choque. A partir deste resumo

retrospecto constata-se o fato de que a grande maioria deles é destinada a parametrização da seção de choque de células e/ou de elementos combustíveis a poucos grupos de energia em função de parâmetros de estado, incluindo o burn-up. Em todos os trabalhos pode-se observar a descrição de processos de fácil aplicação e entendimento, mas que reduzam a introdução de desvios.

1.3 INSERÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA

Esta dissertação de mestrado visa à continuação do trabalho desenvolvido em 2013 (FIEL, 2013), realizando a geração e análise de uma representação parametrizada, a partir de funções polinomiais, das seções de choque macroscópicas homogeneizadas e colapsadas a dois grupos de energia, de um elemento combustível de um reator do tipo PWR, em função de parâmetros nucleares, tais como, a temperatura do combustível, a temperatura e densidade do moderador, a concentração de boro solúvel, o enriquecimento do $^{235}_{92}\text{U}$, e considerando o burn-up para vários ciclos de queima. Dentre as seções de choque analisadas encontram-se a seção de choque de fissão, total, espalhamento total, espalhamento entre grupos, absorção, captura radioativa, nu-fissão e transporte.

A metodologia utilizada apresenta uma alternativa para o cálculo de seções de choque macroscópicas homogeneizadas, por meio de uma biblioteca de funções de seções de choque parametrizadas, que possibilite a análise de um reator a dois grupos, de forma prática, rápida, e sem o dispêndio de tempo de processamento, comum no uso dos códigos computacionais nucleares convencionais.

A biblioteca de funções de seções de choque parametrizadas foi desenvolvida a partir do método de interpolação por polinômios de Tchebyshev. A escolha da utilização deste método de parametrização se deu devido a algumas vantagens que os polinômios de Tchebyshev possuem perante as outras técnicas de parametrização. Este método utiliza como dados de entrada os resultados provenientes da simulação computacional de um código nuclear, como os demais métodos de parametrização de seção de choque macroscópicas. Nesta dissertação, utilizou-se o código computacional

nuclear SCALE 6.1 como ferramenta de cálculo para a geração das seções de choque a 238 grupos de energia e posterior colapso em dois grupos de energia, um grupo rápido e um grupo térmico.

1.4 DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS

Este trabalho visa mostrar de forma clara e objetiva os resultados obtidos através de análises realizadas. Sendo assim, optou-se por dividir esta dissertação de mestrado em nove capítulos e apêndices. Os capítulos foram dispostos com o intuito de possibilitar uma melhor sequência das ideias apresentadas, abrangendo os aspectos teóricos envolvidos, a técnica de parametrização, bem como, as ferramentas utilizadas para a obtenção dos resultados. Os apêndices desenvolvidos são utilizados para um melhor detalhamento do método empregado e uma melhor visualização do comportamento das seções de choque macroscópicas ao longo dos ciclos de queima, para as duas configurações de elementos combustíveis analisados.

O presente capítulo apresenta uma visão geral sobre a natureza e dificuldades de se obterem os valores de seção de choque e destaca a importância de se possuir esses dados de forma prática. É feito um breve retrospecto bibliográfico dos principais trabalhos publicados, atualmente, sobre os métodos de parametrização das seções de choque macroscópicas a poucos grupos de energia. Por fim, é declarado o objetivo desta dissertação de mestrado, o qual é a geração e análise das seções de choque, macroscópicas homogêneas e colapsadas a dois grupos de energia, parametrizadas através da utilização do método de interpolação por polinômios de Tchebyshev, em função de parâmetros definidos, para o uso em cálculos neutrônicos de um reator do tipo PWR.

O **Capítulo 2** faz uma revisão das definições fundamentais da física nuclear com o propósito de relembrar alguns conceitos necessários para o entendimento dos resultados avaliados, bem como entender a física por trás do comportamento das seções de choque ao longo do funcionamento de um reator nuclear.

O **Capítulo 3** apresenta as definições e propriedades dos polinômios de

Tchebyshev, como método de parametrização utilizado. Definem-se os parâmetros de estado avaliados e os valores de referência destes parâmetros. Também, é descrito o programa em linguagem FORTRAN, empregado como ferramenta de cálculo, para determinação dos coeficientes da expansão polinomial.

O **Capítulo 4** apresenta o código (*software*) nuclear SCALE6.1, responsável pela modelagem dos elementos combustíveis avaliados, queima do combustível e geração das seções de choque macroscópicas. As equações utilizadas para a homogeneização e colapso das seções de choque macroscópicas em análise, bem como as equações para o cálculo de burn-up são descritas. O capítulo também apresenta um diagrama da sequência de operação utilizada. Ao fim, é descrito, de forma sucinta, as bibliotecas de dados nucleares existentes e são realizados testes considerando a análise de criticalidade e o tempo de processamento para a escolha da mesma.

No **Capítulo 5** são descritos e modelados as duas configurações dos elementos combustíveis (EC), com e sem veneno queimável, tratados no código SCALE 6.1. São relatadas, também, as composições utilizadas. A simulação no módulo KENO-VI permitiu a modelagem em 3D (três dimensões) dos elementos combustíveis, e a partir da análise da criticalidade foi possível verificar a validade da geometria, configuração e composição dos mesmos.

O **Capítulo 6** apresenta, por meio de gráficos e tabelas, o comportamento das seções de choque macroscópicas, assim como o comportamento do fator de multiplicação, nos cálculos para o elemento combustível sem veneno queimável. Os resultados obtidos são em função dos parâmetros de estado avaliados para os ciclos zero, um, dois e três de queima.

O **Capítulo 7**, de forma análoga ao capítulo 6, descreve os resultados dos cálculos para o elemento combustível com veneno queimável.

O **Capítulo 8** descreve os testes de parâmetros de projeto, como do coeficiente de reatividade de temperatura do combustível e o fator de fissão rápido, comparando os resultados provenientes da simulação no código SCALE 6.1 com os obtidos através da expansão dos polinômios parametrizados de Tchebyshev. Também são feitas comparações do cálculo direto, a partir dos dados resultantes diretamente do código, com as funções parametrizadas através do método de Tchebyshev e de Lagrange.

Por fim, o **Capítulo 9** apresenta as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 DEFINIÇÕES FUNDAMENTAIS

2.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentado um suporte teórico necessário ao entendimento da metodologia e interpretação dos resultados e conclusões. Ele é iniciado com a descrição da interação do nêutron com a matéria, passando pela definição da seção de choque, efeitos da temperatura no comportamento da seção de choque, até os conceitos básicos da teoria de transporte.

2.2 INTERAÇÃO DO NEUTRON COM A MATÉRIA

A operação de um reator nuclear depende, fundamentalmente, da maneira com que o nêutron interage com o núcleo atômico. Em um reator de fissão nuclear térmico é necessário que haja a reação em cadeia sustentável, realizada por nêutrons em um material físsil.

Os nêutrons não possuem carga elétrica, com isso, eles podem facilmente penetrar através da nuvem de elétrons e da barreira de Coulomb do núcleo atômico. Sua interação se dá por meio de reações nucleares, podendo interagir com qualquer tipo de núcleo, de várias formas. A interação dos nêutrons com o núcleo pode ser dividida em duas formas: espalhamento elástico e inelástico; e absorção que é a soma da fissão e da captura radioativa. De uma maneira ou outra, essas interações devem ser levadas em conta no projeto de um reator nuclear.

2.2.1 CAPTURA

A captura radioativa, ou reação (n, γ) , consiste na absorção pura e simples de um nêutron incidente pelo núcleo alvo, que volta do estado excitado para o estado fundamental emitindo raios gama, deixando a massa atômica acrescida de uma unidade. A captura radioativa também é chamada de absorção parasita, já que retira nêutrons do sistema e degrada a criticalidade (BARROSO, 2009). É responsável, entretanto, pela produção de isótopos, como por exemplo, o $^{239}_{94}\text{Pu}$ pela captura radioativa de um nêutron pelo $^{238}_{92}\text{U}$.

2.2.2 FISSÃO

A fissão ocorre quando um nuclídeo formado pela absorção de um nêutron apresenta grande instabilidade de massa, provocando a divisão do núcleo. O núcleo se divide em dois fragmentos de massas intermediárias, liberando no processo em média 2,5 a 3 nêutrons, com energia média de 2 MeV, sendo esses nêutrons responsáveis pela exequibilidade da reação de fissão em cadeia. A energia total liberada pela fissão é cerca de 200 MeV, dais quais, 80 % é levada pelos produtos de fissão, que depositam localmente sua energia no meio (KAPLAN, 1978).

2.2.3 ESPALHAMENTO

As interações de espalhamento podem ser elásticas ou inelásticas. No espalhamento o nêutron interage com o núcleo, mas continua livre, modificando, entretanto a sua velocidade (energia) e direção da trajetória. As interações elásticas ocorrem para qualquer energia do nêutron e são muito importantes no processo de moderação. Ocorre quando o nêutron é espalhado pelo núcleo, que não sofre

variações no estado de sua energia interna. Neste caso, há conservação da energia cinética do sistema nêutron-núcleo, com o nêutron transferindo parte de sua energia cinética para o núcleo. O espalhamento elástico pode variar a direção e a energia do nêutron incidente. Se há igual probabilidade de espalhamento em ambas as direções, diz-se que o espalhamento é isotrópico, do contrário, denomina-se anisotrópico (BARROSO, 2009). A perda de energia do nêutron depende da massa do núcleo com o qual ele se choca. Para núcleos pesados, ou seja, com massa atômica elevada, a perda de energia a partir do espalhamento elástico é insignificante, tendo importância maior apenas na mudança de direção do nêutron. O processo de termalização, ou moderação, é predominante no espalhamento elástico em elementos leves, devido os mesmos possuírem níveis de energia de excitação da ordem de MeV ou mais.

Nas interações inelásticas, o nêutron incidente é capturado pelo núcleo, que emite fótons gama e outro nêutron com energia cinética menor que a energia do nêutron incidente. Esta interação só é possível a partir de determinado valor de energia, capaz de colocar o núcleo alvo em seu primeiro nível de excitação. Neste espalhamento não há conservação da energia cinética. Há, então, perda muito maior de energia do nêutron espalhado, ocorrendo, normalmente, com núcleos de massa atômica elevada, cujas diferenças de energia dos estados excitados são compatíveis com a perda de energia do nêutron incidente. O espalhamento inelástico em núcleos pesados passa ser o processo dominante de termalização.

Evidentemente, cada uma dessas reações descritas anteriormente possui certa probabilidade de ocorrência, dependendo da energia do nêutron incidente e das características dos núcleos com os quais interage. Essa probabilidade se define através do conceito de seção de choque.

2.2.4 SEÇÃO DE CHOQUE

A descrição da interação de nêutrons com o núcleo atômico pode ser medida quantitativamente por meio do conceito de seção de choque. Se um dado material é exposto às ações de nêutrons, a taxa à qual ocorre qualquer reação nuclear particular

depende do número de nêutrons, a sua velocidade, e o número e natureza dos núcleos do material especificado.

2.2.4.1 SEÇÃO DE CHOQUE MICROSCÓPICA

A seção de choque microscópica σ de um núcleo alvo para qualquer dada reação é a medida da probabilidade de interação nêutron-núcleo e é uma propriedade do núcleo alvo e da energia do nêutron incidente (GLASSTONE E SESONSKE, 1994).

Considerando um feixe paralelo de nêutrons monoenergéticos, ou seja, nêutrons com a mesma velocidade e direção, incidindo perpendicularmente, por um determinado tempo, através de uma fina camada de material (um átomo de espessura), conforme a FIG. 2.1. Neste caso a taxa de reação nêutron-núcleo R ($\#/cm^2 \cdot s$) no alvo será proporcional tanto à intensidade do feixe incidente de nêutrons I ($\#/cm^2 \cdot s$) e o número de átomos do alvo por unidade de área N_A ($\#/cm^2$), conforme:

$$R = \sigma I N_A \quad (2.1)$$

Para que as unidades da taxa sejam dadas em ($\#/cm^2 \cdot s$), fica implícito que σ tenha unidades de área (cm^2). Sendo assim, ao rearranjar a EQ. 2.1, tem-se a seção de choque microscópica dada por:

$$\sigma = \frac{\text{número de reações/núcleo/tempo}}{\text{número de nêutrons incidentes/área/tempo}} = \frac{R/N_A}{I} \quad (2.2)$$

Devido à seção de choque microscópica ser muito pequena, no intervalo de 10^{-22} a 10^{-26} cm , ela é usualmente medida em unidades de área chamada de *barn* (b), onde $1 b = 10^{-24}$ cm^2 .

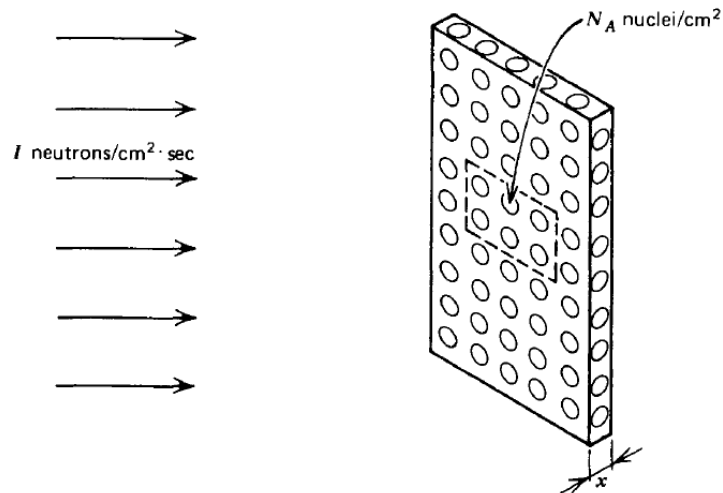


FIG. 2.1 Feixe monoenergético de nêutrons incidindo em uma camada fina de material (DUDERSTADT E HAMILTON, 1976).

Visto que a seção de choque microscópica é a probabilidade que uma reação nêutron-núcleo ocorra, faz-se necessário a definição da seção de choque microscópica para cada tipo de reação nêutron-núcleo e para cada tipo de nuclídeo. Logo, a seção de choque microscópica total σ_t , considera todas as interações existentes, sendo dada pela soma da seção de choque de espalhamento σ_s e a seção de choque de absorção σ_a , e as mesmas são resultantes da soma de outras seções de choque, conforme:

$$\sigma_t = \sigma_s + \sigma_a = \sigma_e + \sigma_{in} + \sigma_f + \sigma_\gamma + \sigma_{n\alpha} + \dots \quad (2.3)$$

A FIG. 2.2 apresenta um diagrama hierárquico das seções de choque microscópicas.

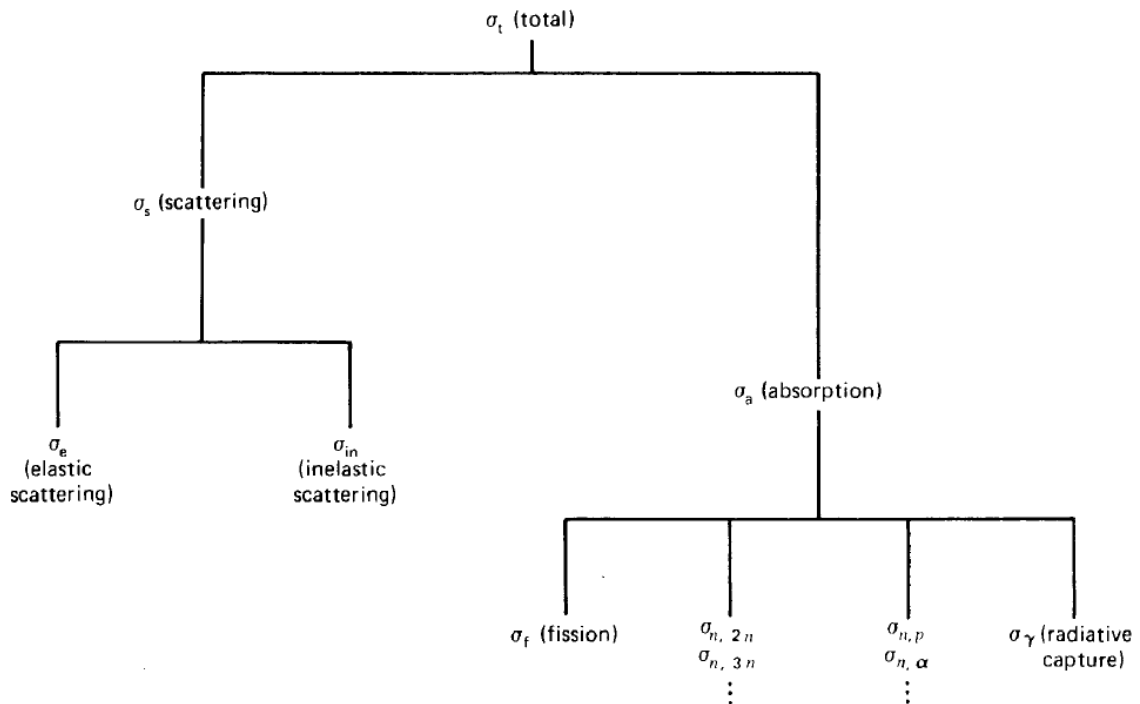


FIG. 2.2 Diagrama hierárquico das seções de choque microscópicas (DUDERSTADT E HAMILTON, 1976).

2.2.4.2 SEÇÃO DE CHOQUE MACROSCÓPICA

Uma vez que o material que é incidido pelo feixe de nêutrons contém N núcleos por cm^3 , a quantidade σN é equivalente à seção de choque total de núcleos por volume e é então chamada de seção de choque macroscópica, representada por Σ e dada em unidades de cm^{-1} .

Todas as seções de choque de interação nêutron-núcleo (fissão, captura radioativa, espalhamento, etc.) dependem da energia do nêutron incidente $\sigma(E)$ e como o material não tem uma composição uniforme, fazendo N ser diferente em determinada posição, e o mesmo podendo ser instável e mudar a composição em função do tempo, tem-se:

$$\Sigma(r, E, t) = N(r, t)\sigma(E) \quad (2.4)$$

2.2.5 EFEITO DA TEMPERATURA NA INTERAÇÃO DOS NÊUTRONS

Na prática, o único efeito que pode influenciar as leis de interação fundamentais entre nêutrons e os núcleos alvos no nível microscópico, é o movimento térmico dos átomos. Embora as seções de choque sejam comumente associadas com a energia do nêutron, ela na realidade depende da energia relativa da interação entre nêutrons e o núcleo. Os núcleos na forma de um sólido estão vibrando sobre pontos fixos na estrutura do cristal e a energia de vibração aumenta com a temperatura. Além disso, mesmo a uma dada temperatura, as energias vibracionais tenderão a ter uma distribuição Maxwelliana numa larga gama de energias. Assim, mesmo para um feixe incidente de nêutrons monoenergéticos, as energias, em relação aos núcleos alvo irão variar dentro de uma gama que se estende tanto abaixo como para acima da energia dos nêutrons (LAMARSH, 1966). Este fenômeno é referido como o *Efeito Doppler* por causa da semelhança com as mudanças no comprimento de onda observada com uma fonte de luz em movimento, ou som, de frequência aparentemente fixa.

2.2.5.1 EFEITO DOPPLER

Como as energias vibracionais do núcleo alvo aumentam com o aumento da temperatura, o intervalo da energia relativa da interação nêutron-núcleo também aumenta. Assim, como um resultado do efeito Doppler, a largura de um pico de ressonância é aumentada à medida que a temperatura é aumentada. Este fenômeno é chamado de Alargamento Doppler das Ressonâncias (*Doppler Broadening*). O alargamento do pico é acompanhado por uma diminuição na altura, mantendo a área sob a ressonância inalterada, conforme é mostrado na FIG. 2.3. O alargamento Doppler das ressonâncias aumenta a absorção parasita dos nêutrons no combustível, que afeta a estabilidade do reator.

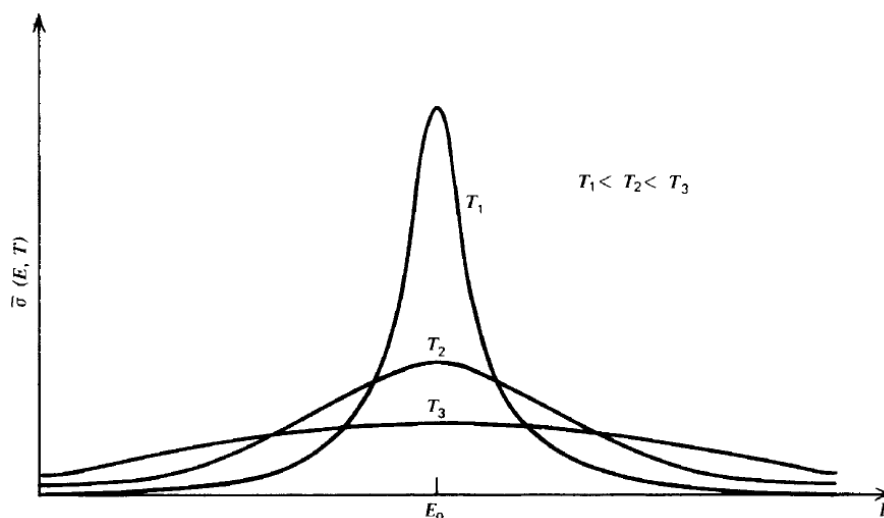


FIG. 2.3 Alargamento Doppler das ressonâncias com o aumento da temperatura (DUDERSTADT E HAMILTON, 1976).

A interpretação do efeito Doppler depende do ponto de vista. Na teoria do reator, o aumento da absorção parasita é interpretado pelo resultado do enfraquecimento da autoblindagem ressonante. A autoblindagem, entretanto, é um efeito macroscópico, que não afeta o nêutron individualmente. Pelo ponto de vista do nêutron, é a variação aleatória na velocidade relativa entre o nêutron e o núcleo alvo que causa um aumento na probabilidade de interação. Quando a energia do nêutron está perto de um pico de alta ressonância, a dependência de energia é forte, e o movimento térmico do átomo alvo ocasionalmente desloca a energia mais próxima do valor de pico (LEPPÄNEN, 2007).

2.3 CONCEITOS BÁSICOS DA TEORIA DE TRANSPORTE DE NÊUTRONS

2.3.1 TAXA DE REAÇÃO E FLUXO DE NÊUTRONS

Antes da definição da taxa de reação, faz-se necessário conhecer a densidade de nêutrons e o fluxo de nêutrons. A densidade de nêutrons $N(r, E, t)d^3r$ é definida pelo

número de nêutrons esperados no volume d^3r na posição r , na energia E e no tempo t . A densidade de nêutrons é importante, pois permite a partir dela calcular a taxa à qual ocorrem as reações nucleares em qualquer ponto do reator. Considerando que os nêutrons tem a mesma velocidade v dentro do reator, logo a frequência de interação nêutron-núcleo é dada por:

$$v\Sigma \equiv \text{frequência de interação } [s^{-1}] \quad (2.5)$$

Ao multiplicar a densidade de nêutrons com a frequência de interação, tem-se a taxa de reação, dada por:

$$F(r, E, t)d^3rdE = v\Sigma(E)N(r, E, t)d^3rdE \quad (2.6)$$

O produto $vN(r, E, t)$ aparece com muita frequência na teoria do reator, e, portanto, é dado um nome especial:

$$\phi(r, E, t) \equiv vN(r, E, t) \equiv \text{fluxo de nêutrons } [cm^{-2} \cdot s^{-1}] \quad (2.7)$$

Logo, a taxa de reação é dada por:

$$F(r, E, t) = \Sigma(E)\phi(r, E, t) \quad (2.8)$$

O fluxo de nêutrons apresentado não é o mesmo encontrado na teoria eletromagnética ou de condução de calor, que são fluxos vetoriais, mas sim o fluxo de nêutrons é escalar. Porém, para caracterizar as variáveis que representam o comportamento do nêutron frente às interações nêutron-núcleo, além da posição, energia e tempo, é necessário determinar a direção do mesmo. Onde a direção angular é caracterizada pelo vetor unitário $\hat{\Omega} = v/|v|$.

A partir disto, define-se a densidade angular de nêutrons como $n(r, E, \hat{\Omega}, t)d^3rdEd\hat{\Omega}$. O termo angular se dá ao fato que $n(r, E, \hat{\Omega}, t)$ depende da coordenada esférica da velocidade nos ângulos θ e φ especificando a direção do

nêutron $\hat{\Omega}$.

Analogamente ao fluxo de nêutrons, tem-se o fluxo angular de nêutrons, simplesmente fazendo a multiplicação da densidade angular com a velocidade do nêutron:

$$\phi(r, E, \hat{\Omega}, t) \equiv v n(r, E, \hat{\Omega}, t) \quad (2.9)$$

Assim, a corrente de nêutrons é dada por:

$$\vec{j}(r, E, \hat{\Omega}, t) \equiv v \hat{\Omega} n(r, E, \hat{\Omega}, t) = \hat{\Omega} \phi(r, E, \hat{\Omega}, t) \quad (2.10)$$

2.3.2 EQUAÇÃO DE TRANSPORTE DE NÊUTRONS

A equação de transporte de nêutrons segue o princípio de balanço de nêutrons, considerando os vários mecanismos dos quais os nêutrons possam ser adquiridos ou perdidos a partir de um volume de controle V arbitrário, dentro de um sistema, a uma específica energia E e viajando em uma específica direção $\hat{\Omega}$. O número de nêutrons em V com energia E em dE e viajando na direção $\hat{\Omega}$ em $d\hat{\Omega}$ dentro deste volume de controle, pode ser escrito como:

$$\left[\int_V n(r, E, \hat{\Omega}, t) d^3r \right] dE d\hat{\Omega}. \quad (2.11)$$

A taxa de variação do número de nêutrons em função do tempo é então dada pela relação de balanço de nêutrons:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\int_V n(r, E, \hat{\Omega}, t) d^3r \right] dE d\hat{\Omega} = \text{ganho em } V - \text{perda em } V \quad (2.12)$$

A partir do balanço obtido na EQ. 2.12, faz-se necessário uma classificação das

várias maneiras das quais os nêutrons aparecem e desaparecem dentro do volume de controle V . A descrição para cada um dos vários mecanismos estão expressas matematicamente em termos da densidade angular de nêutrons $n(r, E, \hat{\Omega}, t)$.

- Mecanismos de ganho de nêutrons:

i) Fonte de nêutrons em V : Define-se a taxa de nêutrons

$s(r, E, \hat{\Omega}, t)d^3rdEd\hat{\Omega}$ aparecendo em d^3r na posição r , dE na energia E e $d\hat{\Omega}$ na direção $\hat{\Omega}$:

$$i = \left[\int_V s(r, E, \hat{\Omega}, t)d^3r \right] dEd\hat{\Omega}. \quad (2.13)$$

ii) Nêutrons entrando em V a partir da superfície S ;

iii) Nêutrons com diferentes $E', \hat{\Omega}'$ que sofrem espalhamento e passam de $E', \hat{\Omega}'$ para $E, \hat{\Omega}$ de interesse, considerando a contribuição de qualquer $E', \hat{\Omega}'$:

$$\text{iii} = \left[\int_V d^3r \int_{4\pi} d\hat{\Omega}' \int_0^\infty dE' v' \Sigma_s(E' \rightarrow E, \hat{\Omega}' \rightarrow \hat{\Omega}) n(r, E', \hat{\Omega}', t) \right] dEd\hat{\Omega}. \quad (2.14)$$

- Perda de nêutrons

iv) Nêutrons saindo de V através da superfície S ;

v) Nêutrons absorvidos em V ou sendo espalhados de $E, \hat{\Omega}$ para $E', \hat{\Omega}'$:

$$v = v\Sigma_a(r, E, \hat{\Omega}, t)n(r, E, \hat{\Omega}, t) + \int_{4\pi} d\hat{\Omega} \int_0^\infty dE' v \Sigma_s(E \rightarrow E', \hat{\Omega} \rightarrow \hat{\Omega}') n(r, E, \hat{\Omega}, t). \quad (2.15)$$

Como:

$$\Sigma_t = \Sigma_a + \Sigma_s \quad (2.16)$$

Logo:

$$v = \left[\int_V v \Sigma_t(r, E, \hat{\Omega}, t) n(r, E, \hat{\Omega}, t) d^3r \right] dE d\hat{\Omega}. \quad (2.17)$$

ii-iv) Nêutrons entrando ou saindo de V : Os dois termos foram combinados, calculando assim a fuga líquida através da superfície S em dS e usando o conceito da corrente de nêutrons $\vec{J}(r, E, \hat{\Omega}, t)$, tem-se:

$$\text{ii} - \text{iv} = \int_S dS \vec{J}(r, E, \hat{\Omega}, t) \quad (2.18)$$

O qual pode ser escrito em termos do volume de controle V utilizando o Teorema da Divergência de Gauss:

$$\text{ii} - \text{iv} = \int_V \nabla \vec{J}(r, E, \hat{\Omega}, t) d^3r = \nabla \vec{J}(r, E, \hat{\Omega}, t) \quad (2.19)$$

Usando as definições apresentadas nas EQ. 2.9 e 2.10, e simplificando as integrais de volume, o balanço de nêutrons dá origem à equação de transporte de nêutrons:

$$\frac{1}{v} \frac{\partial \phi}{\partial t} = S(r, E, \hat{\Omega}, t) + \int_{4\pi} d\hat{\Omega}' \int_0^\infty dE' \Sigma_s(E' \rightarrow E, \hat{\Omega}' \rightarrow \hat{\Omega}) \phi(r, E', \hat{\Omega}', t) - \Sigma_t \phi(r, E, \hat{\Omega}, t) - \hat{\Omega} \nabla \phi(r, E, \hat{\Omega}, t) \quad (2.20)$$

A equação de transporte apresenta várias características gerais de interesse. Primeiramente, é uma equação linear na variável dependente desconhecida $n(r, E, \hat{\Omega}, t)$ com sete variáveis independentes ($r = x, y, z; E; \hat{\Omega} = \theta, \varphi; t$). Uma vez que contêm derivadas no espaço e no tempo, bem como integrais sobre o ângulo e energia, ela é conhecida como uma equação integro-diferencial.

2.3.3 EQUAÇÃO DE DIFUSÃO

A equação integro-diferencial de transporte de nêutrons pode ser resolvida somente em casos bem simples, como por exemplo, para nêutrons monoenergéticos decorrentes de uma fonte plana em um meio infinito com espalhamento isotrópico. Para cálculos mais complexos, balanço de nêutrons em um reator nuclear, é necessário usar aproximações da equação de transporte de nêutrons.

Para o sistema tendo um eixo de simetria, tais como os que são considerados na análise de um reator, as harmônicas esféricas utilizadas para representar a variável de direção podem ser substituídos por funções polinomiais de Legendre. Assim, a função de espalhamento $\Sigma_s(E' \rightarrow E, \hat{\Omega}' \rightarrow \hat{\Omega})$, o fluxo angular $\phi(r, E', \hat{\Omega}', t)$, e fonte $S(r, E, \hat{\Omega}, t)$ são expressos como a soma de uma série infinita de termos contendo polinômios de Legendre do cosseno do ângulo de espalhamento entre a direção $\hat{\Omega}$ e o principal eixo de coordenadas. O resultado é um conjunto infinito de equações diferenciais acopladas, cada uma caracterizada por um valor de n que pode ser zero ou integral. Este conjunto de equações é exatamente equivalente à equação de transporte original. Quanto maior o valor de n , melhor será a aproximação, e maior o tempo de processamento.

A aproximação P_1 , $n = 1$, utiliza somente as duas primeiras equações do conjunto ($n = 0$ e $n = 1$), da qual é a mais usada para o trato de um reator nuclear. Essas duas equações contém os primeiros dois termos da expansão de Legendre, que acabam por ser idêntico ao fluxo angular de nêutrons e a corrente de nêutrons, pois se considera que o fluxo e a corrente de nêutrons estão divididos entre uma função de posição r e função de direção $\hat{\Omega}$. Para o fluxo angular, tem-se:

$$\int_{4\pi} \phi(r, \hat{\Omega}) d\hat{\Omega} = \int_{4\pi} f_0(r) d\hat{\Omega} + \int_{4\pi} f_1(r) \hat{\Omega} d\hat{\Omega} \quad (2.21)$$

A partir das integrais notáveis, o fluxo angular integrado em todas as direções $\Phi(r)$ fica:

$$\Phi(r) = 4\pi \cdot f_0(r) \quad (2.22)$$

Fazendo o mesmo para a corrente de nêutrons:

$$\vec{J}(r) = \int_{4\pi} \hat{\Omega} \phi(r, \hat{\Omega}, t) d\hat{\Omega} = \int_{4\pi} f_0(r) \hat{\Omega} d\hat{\Omega} + \int_{4\pi} f_1(r) \hat{\Omega} \cdot \hat{\Omega} d\hat{\Omega} = \frac{4\pi}{3} f_1(r) \quad (2.23)$$

Então, o fluxo de nêutrons fica, conforme:

$$\phi(r, \hat{\Omega}, t) \cong f_0(r) + f_1(r) \hat{\Omega} = \frac{\Phi(r, t)}{4\pi} + \frac{3}{4\pi} \vec{J}(r, t). \quad (2.24)$$

Aplicando a aproximação, de forma análoga, para a fonte e pra a função de espalhamento, considerando ambos isotrópicos, têm-se:

$$s(r, \hat{\Omega}, t) = \int_{4\pi} s(r, \hat{\Omega}, t) d\hat{\Omega} \equiv 4\pi f_0 = \frac{S(r, t)}{4\pi}, \quad (2.25)$$

e:

$$\Sigma_s(\hat{\Omega}' \rightarrow \hat{\Omega}) \cong \frac{\Sigma_s}{4\pi} + \frac{3}{4\pi} \Sigma_s \bar{\mu}_0 (\hat{\Omega}' \cdot \hat{\Omega}), \quad (2.26)$$

onde $\bar{\mu}_0$ representa a variação média do $\cos(\theta)$, visto que $\langle \hat{\Omega}' \cdot \hat{\Omega} \rangle \equiv \langle \cos(\theta) \rangle$.

Aplicando as EQ. 2.24, 2.25 e 2.26 na equação de transporte de nêutrons, 2.20, obtêm-se:

$$\frac{1}{v} \frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{S(r, t)}{4\pi} + \frac{\Sigma_s}{4\pi} \Phi(r, t) + \frac{3}{4\pi} \Sigma_s \bar{\mu}_0 \vec{J}(r, t) \hat{\Omega} - \Sigma_t \phi(r, E, \hat{\Omega}, t) - \hat{\Omega} \nabla \phi(r, E, \hat{\Omega}, t). \quad (2.27)$$

Para a maioria dos cálculos utilizados em um reator nuclear, a dependência angular do fluxo não é necessária, logo integrando a EQ. 2.27 no ângulo sólido, obtêm-se a Equação da Continuidade, dada por:

$$\frac{1}{v} \frac{\partial}{\partial t} \Phi(r, t) = S(r, t) - \Sigma_t \Phi(r, t) - \nabla \vec{J}(r, t). \quad (2.28)$$

É interessante notar que a EQ. 2.28 contém duas variáveis dependentes desconhecidas, $\phi(r, E, t)$ e $\vec{J}(r, E, t)$, diferentemente da equação de transporte de nêutrons que contém somente uma variável dependente desconhecida, $n(r, E, \hat{\Omega}, t)$. Quando a dependência angular foi retirada, foi introduzida mais uma variável dependente desconhecida, $\vec{J}(r, E, t)$, tornando a solução da equação impossível, pois tem-se somente uma equação para duas variáveis desconhecidas.

A partir da comparação das definições das EQ. 2.21 e 2.23, foi proposto multiplicar a equação de transporte por $\hat{\Omega}$ e, novamente, integrar ao longo do ângulo sólido, resultando em:

$$\frac{1}{v} \frac{\partial}{\partial t} \vec{J}(r, t) = \Sigma_s \bar{\mu}_0 \vec{J}(r, t) - \Sigma_t \vec{J}(r, t) - \frac{1}{3} \nabla \Phi(r, t) \quad (2.29)$$

Rearranjando a equação, tem-se:

$$\frac{1}{v} \frac{\partial}{\partial t} \vec{J}(r, t) + \frac{1}{3} \nabla \Phi(r, t) = -(\Sigma_t - \Sigma_s \bar{\mu}_0) \vec{J}(r, t). \quad (2.30)$$

Da EQ. 2.30, define-se a seção de choque macroscópica de transporte Σ_{tr} :

$$\Sigma_{tr}(r) = \Sigma_t(r) - \Sigma_s(r) \bar{\mu}_0. \quad (2.31)$$

Considerando a EQ. 2.30 em estado estacionário e deixando a equação em função da corrente de nêutrons, tem-se:

$$\vec{J}(r, t) = -\frac{1}{3\Sigma_{tr}(r)} \nabla \Phi(r, t). \quad (2.32)$$

Foi observado que há um movimento global de nêutrons a partir de regiões de maior para as de menor densidade de nêutrons (ou fluxo). De acordo com a lei de difusão de Fick, a densidade de corrente de nêutrons é proporcional ao gradiente

especial do fluxo, conforme:

$$\vec{J}(r, t) = -D(r)\nabla\Phi(r, t). \quad (2.33)$$

A partir da lei de difusão de Fick, apresentada na EQ. 2.33, acima, definiu-se o coeficiente de difusão de nêutrons D por:

$$D \equiv \frac{1}{3[\Sigma_t(r) - \Sigma_s(r)\bar{\mu}_0]} = \frac{1}{3\Sigma_{tr}(r)} \quad (2.34)$$

Utilizando a definição do coeficiente de difusão de nêutrons na equação da continuidade, obtida na EQ. 2.28, obtém-se a Equação da Difusão, conforme:

$$\frac{1}{v} \frac{\partial}{\partial t} \Phi(r, t) = S(r, t) - \Sigma_a \Phi(r, t) + D(r)\nabla^2 \Phi(r, t), \quad (2.35)$$

ou no formato independente do tempo:

$$S = \Sigma_a \Phi(r) - D(r)\nabla^2 \Phi(r). \quad (2.36)$$

2.3.4 EQUAÇÃO DE DIFUSÃO MULTIGRUPO

A Equação da Difusão encontrada na EQ. 2.35 trata os nêutrons como se os mesmos fossem caracterizados por ter somente um valor de velocidade, ou um valor de energia. Porém, os nêutrons, em um reator nuclear, têm energias variando de 10 MeV até 0,01 eV. Logo, se faz necessário discretizar a Equação de Difusão em relação à energia. Para atender todo o intervalo de energia que um nêutron possa ter, dentro de um reator nuclear, considera-se a divisão desse intervalo total de energia em grupos, conforme:

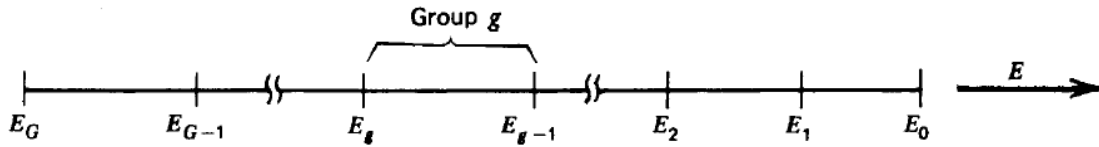


FIG. 2.4 Grupos de energia do nêutron (DUDERSTADT E HAMILTON, 1976).

Lembrando que o nêutron nasce com energia alta, logo E_0 , e vai perdendo energia conforme vai sofrendo espalhamentos, até chegar à energia E_G , conceito este chamado de Letargia.

Com a separação da energia dos nêutrons em grupos de energia, é mais conveniente discretizar o fluxo de nêutrons $\phi(r, E, t)$ como sendo um fluxo multigrupo $\phi_G(r, t)$, do que integrar o fluxo de nêutrons em relação à energia de cada grupo. Então, $\phi_G(r, t)$ representa o fluxo total de todos os nêutrons com energia E dentro do grupo $E_g < E < E_{g-1}$.

Partindo do conceito do balanço de nêutrons para um determinado grupo de energia e considerando as várias formas com que o nêutron possa entrar ou sair deste grupo, temos:

$$\left[\begin{array}{c} \text{Variação do} \\ \text{número de} \\ \text{nêutrons do} \\ \text{grupo } g \end{array} \right] = - \left[\begin{array}{c} \text{Perdas} \\ \text{devido} \\ \text{à fuga} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{Absorção} \\ \text{no} \\ \text{grupo } g \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{Fonte de} \\ \text{nêutrons} \\ \text{aparecendo} \\ \text{no grupo } g \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{Nêutrons} \\ \text{espalhados} \\ \text{para fora do} \\ \text{grupo } g \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{Nêutrons} \\ \text{espalhados} \\ \text{para dentro} \\ \text{do grupo } g \end{array} \right]$$

FIG. 2.5 Balanço de nêutrons considerando o grupo de energia (DUDERSTADT E HAMILTON, 1976).

Do balanço apresentado na FIG. 2.5, caracteriza-se a constante de grupo¹ para a probabilidade de espalhamento do grupo g' para o grupo g , como $\Sigma_s(E_{g'} \rightarrow E_g)$, como:

$$\Sigma_{sg} = \sum_{g'=1}^G \Sigma_{sgg'} \quad (2.37)$$

¹ Para a geração das constantes de grupo, deve-se integrar na energia do grupo, multiplicar e dividir pelo fluxo de nêutrons total no grupo a ser considerado.

Como a maioria dos cálculos de difusão a poucos grupos de energia utilizam somente um grupo térmico para descrever os nêutrons com $E < 1 \text{ eV}$, e assumindo que nenhum nêutron possa espalhar para fora do grupo térmico, a constante de grupo para o espalhamento pode ser dado por:

$$\sum_{g'=1}^G \Sigma_{sg'g} \phi_{g'} = \sum_{g'=1}^{g-1} \Sigma_{sg'g} \phi_{g'} + \Sigma_{sgg} \phi_g \quad (2.38)$$

Onde, Σ_{sgg} pode ser separado da constante de grupo de espalhamento, caracterizando a probabilidade de um nêutron sofrer espalhamento e perder pouca energia, a ponto de continuar no mesmo grupo. É então definida a seção de choque de remoção, a qual caracteriza-se pela probabilidade de um nêutron ser removido do grupo através de um espalhamento, dada por:

$$\Sigma_{Rg} \equiv \Sigma_{tg} - \Sigma_{sgg} \quad (2.39)$$

Analogamente, define-se a constante de grupo para a seção de choque de absorção caracterizada no grupo g , Σ_{ag} , e a constante de grupo para o termo da fonte S_g dada pela taxa a qual os nêutrons aparecem no grupo g . Finalmente, define-se a constante de grupo para o coeficiente de difusão D_g , então a fuga do grupo g pode ser escrita em termos da aproximação de difusão, como $\nabla \cdot D_g \nabla \phi_g$. Logo, o balanço obtido na FIG. 2.6 pode ser escrito como:

$$\frac{1}{v} \frac{\partial \phi_g}{\partial t} = \nabla \cdot D_g \nabla \phi - \Sigma_{ag} \phi_g + S_g \phi_g - \Sigma_{sg} \phi_g + \sum_{g'=1}^G \Sigma_{sg'g} \phi_{g'} \quad (2.40)$$

com $g = 1, 2, \dots, G$.

Se separarmos a componente da fonte proveniente da fissão, S_g pode ser escrita por:

$$S_g = \chi_g \sum_{g'=1}^G \nu_{g'} \Sigma_{fg'} \phi_{g'} + S_g^{ext}, \quad (2.41)$$

onde χ_g representa a probabilidade que um nêutron nasça com a energia E dentro do grupo g , $\Sigma_{fg'}$ é a seção de choque de fissão caracterizando o grupo g' , e $\nu_{g'}$ a média de nêutrons liberados na fissão induzida por um nêutron do grupo g' .

Lembrando que $\Sigma_t = \Sigma_a + \Sigma_s$, então a equação de difusão a multigrupo pode ser escrita como:

$$\begin{aligned} \frac{1}{v} \frac{\partial \phi_g}{\partial t} - \nabla \cdot D_g \nabla \phi + \Sigma_{tg} \phi_g(r, t) \\ = \sum_{g'=1}^G \Sigma_{sg'g} \phi_{g'} + \chi_g \sum_{g'=1}^G \nu_{g'} \Sigma_{fg'} \phi_{g'} + S_g^{ext} \end{aligned} \quad (2.42)$$

2.3.5 EQUAÇÃO DE DIFUSÃO A DOIS GRUPOS

Em um reator nuclear do tipo PWR, é comum o cálculo da equação de difusão ser feita utilizando poucos grupos de energia. O reator ANGRA II, por exemplo, utiliza cálculos considerando de dois a quatro grupos de energia. Como isto, esta dissertação de mestrado irá abordar somente o cálculo da equação de difusão a dois grupos de energia, sendo um o grupo rápido e outro o grupo térmico. A energia de corte para o grupo térmico é escolhida suficientemente alta para não haver *upscattering*, ou seja, para que nenhum nêutron pertencente ao grupo térmico ganhe energia e vá para o grupo rápido. Lembrando que o nêutron nasce no grupo rápido e é espalhado para o grupo térmico, perdendo sua energia neste processo.

Escolhendo a estrutura de grupo conforme a FIG. 2.6, temos então:

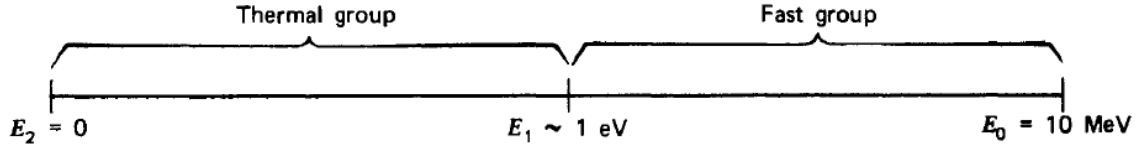


FIG. 2.6 Estrutura de energia a dois grupos de energia (DUDERSTADT E HAMILTON, 1976).

Logo, o fluxo de nêutrons será dado por:

$$\phi_1 = \int_{E_1}^{E_0} \phi(r, E, t) dE \equiv \text{fluxo rápido} \quad (2.43)$$

$$\phi_2 = \int_{E_2}^{E_1} \phi(r, E, t) dE \equiv \text{fluxo térmico} \quad (2.44)$$

As constantes de grupo obtidas anteriormente também serão discretizadas a dois grupos de energia. Primeiro será considerado o espectro de fissão. Considerando que todos os nêutrons obtidos através do processo de fissão nascerão com altas energias, ou seja, no grupo rápido, o espectro de fissão pode ser escrito por:

$$\chi_1 = \int_{E_1}^{E_0} \chi(E) dE = 1 \quad (2.45)$$

$$\chi_2 = \int_{E_2}^{E_1} \chi(E) dE = 0 \quad (2.46)$$

Entretanto, a fonte de nêutrons proveniente da fissão só aparece na equação do espectro rápido de energia:

$$S_{f1} = \nu_1 \Sigma_{f1} \phi_1 + \nu_2 \Sigma_{f2} \phi_2 \quad (\text{grupo rápido}) \quad (2.47)$$

$$S_{f2} = 0 \quad (\text{grupo térmico}) \quad (2.48)$$

Como não há nêutrons térmicos que possam perder energia e sair do grupo

térmico, temos:

$$\int_{E_2=0}^{E_1 \sim 1 \text{ eV}} \Sigma_s(E' \rightarrow E) = \Sigma_s(E'), \quad E_2 \leq E' \leq E_1 \quad (2.49)$$

Logo:

$$\Sigma_{s_{22}} = \frac{1}{\phi_2} \int_{E_2}^{E_1} dE \int_{E_2}^{E_1} \Sigma_s(E' \rightarrow E) \phi(r, E') dE' = \frac{1}{\phi_2} \int_{E_2}^{E_1} \Sigma_s(E') \phi(r, E') dE' \quad (2.50)$$

$$\Sigma_{s_{22}} = \Sigma_{s_2}$$

A seção de choque de remoção fica:

$$\Sigma_{R_2} = \Sigma_{t_2} - \Sigma_{s_{22}} = \Sigma_{t_2} - \Sigma_{s_2} = \Sigma_{a_2} \quad (2.51)$$

O mesmo processo que levou a discretização dos fluxos de nêutrons para o grupo rápido e térmico é feito para a obtenção das constantes de grupo rápido $\nu_1, \Sigma_{f1}, \Sigma_{R1}$ e D_1 , e para as constantes de grupo térmico ν_2, Σ_{f2} e D_1 . Então, a teoria de difusão a dois grupos de energia, considerando as duas equações resultantes estacionárias e com o termo de fonte igual à zero, escritas para o cálculo de criticalidade para um reator, conforme:

$$-\nabla \cdot D_1 \nabla \phi_1 + \Sigma_{R1} \phi_1 = \frac{1}{k} [\nu_1 \Sigma_{f1} \phi_1 + \nu_2 \Sigma_{f2} \phi_2] \quad (2.52)$$

$$-\nabla \cdot D_2 \nabla \phi_2 + \Sigma_{a_2} \phi_2 = \Sigma_{s_{12}} \phi_1 \quad (2.53)$$

onde $1/k$ é o ajuste para a definição de criticalidade.

Das EQ. 2.52 e 2.53 nota-se que o termo de fonte para o grupo rápido corresponde aos nêutrons gerados a partir de fissões, enquanto o termo de fonte para o grupo térmico é representado pela moderação do grupo rápido para o grupo térmico.

2.4 BURN-UP

Durante a operação do reator, a composição inicial do combustível se alterará à medida que os isótopos físeis são consumidos, resultando na produção de actínídeos e produtos de fissão (DUDERSTADT E HAMILTON, 1976). Esta mudança na composição inicial, tanto em função do tempo e do espaço, pode ser determinada pelo cálculo da queima do combustível, ou seja, o cálculo do burn-up.

O cálculo completo do burn-up envolve a solução de algumas equações de taxas de reação que descrevem o processo de centenas de diferentes tipos de isótopos presentes no núcleo do reator. Na prática, são feitas aproximações para simplificar os cálculos. Por exemplo, os únicos produtos de fissão que são geralmente tratados separadamente, pois possuem uma grande seção de choque de captura radioativa são o ^{135}Xe e o ^{149}Sm . Os demais produtos de fissão são agrupados em um ou vários grupos e cada um é caracterizado por uma seção choque. Além disso, qualquer nuclídeo com uma meia-vida curta é omitido do cálculo de burn-up.

Os isótopos de interesse provenientes da queima do urânio enriquecido estão indicados na FIG. 2.8, abaixo. Ao longo do funcionamento do reator, o ^{235}U é consumido e produtos de fissão são formados. Ao mesmo tempo, o ^{238}U captura nêutrons tendo como resultado, após dois decaimentos β , ^{239}Pu . O plutônio físsil gerado captura nêutrons formando ^{240}Pu que novamente captura nêutrons formando ^{241}Pu . Há outros processos de captura de nêutrons que dão como resultante nuclídeos com número atômico maior que 92. Além dos produtos de fissão e os outros isótopos produzidos durante a queima do combustível, deve-se monitorar a concentração dos venenos queimáveis, como o gadolínio e o boro.

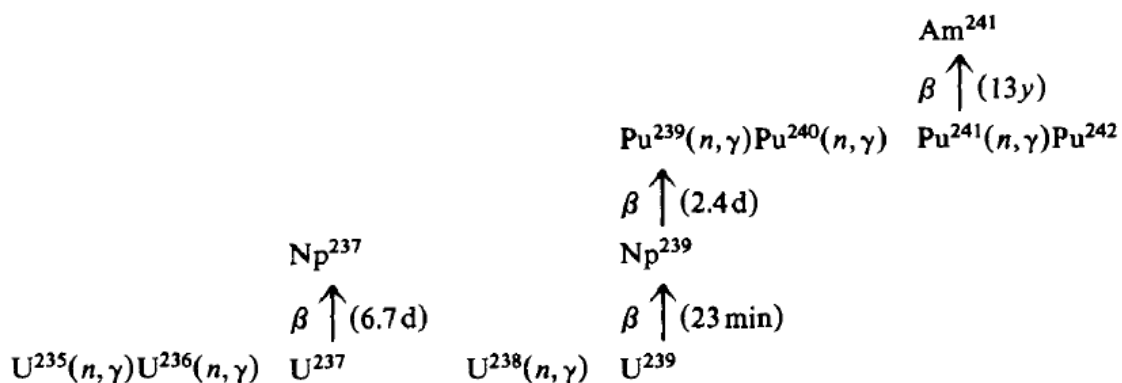


FIG. 2.7 Produtos de fissão gerados na queima do combustível (DUDERSTADT E HAMILTON, 1976).

O cálculo do burn-up para um único isótopo é determinado pela equação:

$$\frac{dN_F(r, t)}{dt} = -N_F(r, t)\bar{\sigma}_a^t\Phi(r, t), \quad (2.54)$$

onde $\bar{\sigma}_a^t$ é a seção de choque de absorção térmica, $\Phi(r, t)$ é o fluxo total em um ponto r e no tempo t e $N_F(r, t)$ é a densidade atômica do isótopo a ser queimado em um ponto r e no tempo t (LAMARSH, 1966).

Se o fluxo total é conhecido, em função do tempo ao longo do reator, $N_F(r, t)$ pode ser encontrada através da avaliação da integral dada na EQ. 2.55, abaixo:

$$N_F(r, t) = N_F(r, 0)\exp\left[-\bar{\sigma}_{aF}\int_0^t\phi_T(r, t)dt\right]. \quad (2.55)$$

Em um reator, a vida útil do combustível é medida pelo burn-up, expresso pela quantidade total de energia térmica gerada por quantidade unitária de massa de urânio inicialmente carregado no reator. Métodos alternativos de expressar o burnup são (1) número de fissões por m^3 de combustível e (2) percentagem de elementos pesados produzidos após a fissão (GLASSTONE E SESONSKE, 1994).

2.5 PRODUTOS DE FISSÃO

Quando um nuclídeo sofre uma fissão, um grande número de produtos de fissão é formado, assim como, há a liberação de nêutrons, radiação γ , emissão de partículas β e neutrinos, podendo ser no momento da fissão ou depois de um período de tempo, conforme os produtos de fissão instáveis vão decaindo.

A fissão do urânio enriquecido, $^{235}_{92}\text{U}$, com nêutrons térmicos faz com que o núcleo composto se divida em mais de 40 maneiras diferentes, gerando mais de 80 produtos de fissão primários, ou chamados fragmentos de fissão. Essa divisão se dá de forma assimétrica, sendo a divisão simétrica um evento extremamente raro, ocorrendo em um a cada 20.000 eventos, ou seja, somente 0,01% de ocorrência. Essa distribuição de probabilidades de geração dos produtos de fissão, em porcentagem, em função do número de massa está apresentada na figura 2.8. Quanto maior for a energia do nêutron incidente mais simétrico torna-se a fissão. O intervalo do número de massa dos produtos gerados na fissão é de 72 a 161.

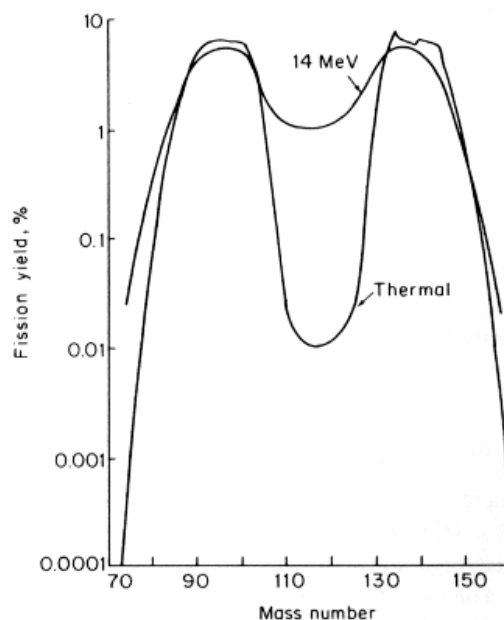


FIG. 2.8 Distribuição dos produtos de fissão para o ^{235}U em função do número de massa (LAMARSH, 1966).

Fazendo uma análise da FIG. 2.8, pode-se concluir que as massas de quase todos

os produtos de fissão caem em dois grandes grupos, um grupo de leve, com números de massa de 80 a 110, e um grupo pesado, com números de massa 125 a 155. Análogo à distribuição do número de massas para a geração dos produtos de fissão está a distribuição das energias cinéticas resultantes dos mesmos. Consequentemente, dois grupos distintos de energia cinética são observados. A energia cinética para os elementos pertencentes ao grupo pesado é de aproximadamente 57 MeV, enquanto para os núclídeos do grupo leve a energia é de aproximadamente 98 MeV.

Durante o processo de fissão, muitos elétrons orbitais dos núclídeos que sofrem a fissão são ejetados, tornando os produtos de fissão altamente carregados. Análogo à partícula α , os produtos de fissão provocam ionização conforme os mesmos interagem com a matéria, mas devido sua massa e carga elevada os produtos de fissão proveniente do grupo leve e pesado tem um alcance de 25 mm e 19 mm, respectivamente, no ar.

3 MÉTODO DE PARAMETRIZAÇÃO DAS SEÇÕES DE CHOQUE MACROSCÓPICAS

3.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados os polinômios de Tchebyshev, descrevendo de forma sucinta sua teoria, definições e propriedades, e o programa em FORTRAN, contendo a sub-rotina da biblioteca NAG (*Numerical Algorithms Group*) responsável pelo cálculo dos coeficientes da expansão polinomial. Também são descritos os parâmetros de estado utilizados para a geração das seções de choque macroscópicas, processadas no módulo T-NEWT do código SCALE, assim como são definidos a relação dos valores dos parâmetros empregados como valores de referência.

3.2 POLINÔMIOS DE TCHEBYSHEV

Os polinômios de Tchebyshev têm aplicações em diversas áreas da matemática, em especial, a Teoria de Aproximação e computação numérica. Eles oferecem grandes vantagens, pois apresentam todas as propriedades referentes aos polinômios ortogonais e as séries de Fourier.

Em relação aos polinômios ortogonais, podem ser citadas as propriedades de satisfazerem uma relação de recorrência de três termos, seus zeros são reais, distintos e estão no intervalo (a, b) se entrelaçando uns aos outros e, são fáceis de obter em forma de série de potência (HAMMING, 1962).

Já as séries de Fourier apresentam em suas propriedades a periodicidade, alternando entre os máximos e mínimos em uma mesma amplitude, assim como, a ortogonalidade entre o seno e o cosseno, tanto sobre um intervalo contínuo como em um conjunto igualmente espaçado de pontos de dados discretos [14,15].

Para a parametrização das seções de choque macroscópicas, resultantes desta dissertação, serão empregados somente os polinômios de Tchebyshev de 1ª ordem, denotados, respectivamente, por T_n e algumas de suas propriedades e aplicações como base matemática da expansão polinomial.

A escolha da utilização dos polinômios de Tchebyshev para compor o método de parametrização das seções de choque macroscópicas se deve ao fato do mesmo apresentar algumas vantagens relacionadas a outros polinômios, podendo destacar a propriedade de minimizar os erros, uniformizando-os. Esta propriedade provém da utilização dos zeros de polinômios ortogonais clássicos em fórmulas de integração numérica e os zeros dos polinômios de Tchebyshev de 1ª ordem em interpolação polinomial, conduzindo a uma melhor precisão no cálculo dos coeficientes e na estimativa subsequente do ajuste polinomial em pontos específicos. Uma análise foi feita, no capítulo 8, a partir da parametrização das seções de choque macroscópicas de um elemento combustível com veneno queimável, em função da temperatura do combustível, utilizando o método por polinômios de Lagrange como base comparativa em relação ao método de parametrização por polinômios de Tchebyshev. Esta análise serviu como verificação da eficiência e da precisão dos resultados apresentados pelo método desenvolvido nesta dissertação de mestrado.

3.2.1 DEFINIÇÃO

O matemático Pafnuty Chebyshev definiu os polinômios de Tchebyshev como uma sequência de polinômios ortogonais, relacionados com a fórmula de Moivre e facilmente obtidos por uma forma recursiva. O uso da letra T para os polinômios de primeira ordem, T_n , foi dado devido a uma das transliterações do sobrenome Chebyshev, que admitem também Tchebyshev, Tchebyshef e Tschebyscheff [16,17]. Os polinômios de Tchebyshev, T_n , são de grau n e a sequência dos polinômios de todos os graus forma uma sequência polinomial.

Os polinômios de Tchebyshev são importantes na teoria de aproximação porque as raízes dos polinômios de primeira ordem podem ser utilizadas na interpolação

polinomial, minimizando o problema do fenômeno de Runge, ou seja, o problema de oscilação nas bordas de um intervalo, e fornecendo uma melhor aproximação de uma função contínua (RIVLIN, 1990).

Os polinômios de primeira ordem são definidos pela relação recursiva

$$T_{n+1}(x) = 2xT_n(x) - T_{n-1}(x), \quad (3.1)$$

sendo sua função geradora para T_n como:

$$\sum_{n=0}^{\infty} T_n(x) \cdot t^n = \frac{1 - tx}{1 - 2tx + t^2} \quad (3.2)$$

3.2.2 PROPRIEDADES

Os polinômios de Tchebyshev são ortogonais no intervalo $[-1,1]$, em relação à função peso (CHIHARA, 1978), definido pela EQ. 2.3

$$\frac{1}{\sqrt{1-x^2}}, \quad (3.3)$$

ou seja:

$$\int_{-1}^1 T_n(x) \cdot T_m(x) \cdot \frac{dx}{\sqrt{1-x^2}} = \begin{cases} 0: n \neq m \\ \pi: n = m = 0 \\ \pi/2: n = m \neq 0 \end{cases} \quad (3.4)$$

A propriedade de identidade, ou aninhamento de composição, é um corolário imediato da definição recursiva dos polinômios de Tchebyshev [16,17], conforme:

$$T_n(T_m(x)) = T_{n.m}(x) \quad (3.5)$$

São chamados de “nós” de Tchebyshev um polinômio de grau n que contenha n raízes simples, compreendidas no intervalo de $[-1,1]$. As raízes são muitas vezes chamadas por este nome porque são frequentemente utilizadas na interpolação polinomial.

Para qualquer $n \geq 1$, entre os polinômios de grau n e o coeficiente principal 1,

$$f(x) = \frac{1}{2^{n-1}} T_n(x) \quad (3.6)$$

é uma função onde o valor absoluto máximo, no intervalo $[-1,1]$, é mínimo. Neste caso, o valor máximo equivale-se a $2^{-(n-1)}$ (HAMMING, 1962).

Os polinômios de Tchebyshev possuem apenas dois valores críticos, tendo os de primeira ordem, máximos e mínimos valores de -1 e 1, respectivamente, no intervalo de $-1 \leq x \leq 1$. Ele também possui os extremos no limite do intervalo de definição das funções, sendo dados por: $T_n(1) = 1$ e $T_n(-1) = (-1)^n$.

Para todo inteiro n não negativo, $T_n(x)$ é um polinômio de grau n . Eles são funções ímpares ou pares de x se n é ímpar ou par, respectivamente.

Qualquer polinômio arbitrário de grau n pode ser escrito em termos de uma somatória de polinômios de Tchebyshev de primeira ordem de grau máximo n (MASON E HANDSCOMB, 2003). Tal polinômio arbitrário $p(x)$ pode ser escrito como:

$$p(x) = \sum_{n=0}^N a_n T_n(x) \quad (3.7)$$

Para a construção da expansão dos coeficientes de Tchebyshev, foram utilizados os primeiros cinco polinômios de Tchebyshev, descritos abaixo:

$$\begin{aligned} T_0(x) &= 1 \\ T_1(x) &= x \\ T_2(x) &= 2x^2 - 1 \\ T_3(x) &= 4x^3 - 3x \\ T_4(x) &= 8x^4 - 8x^2 + 1 \end{aligned} \quad (3.8)$$

3.3 PARAMETRIZAÇÃO DAS SEÇÕES DE CHOQUE

A parametrização tem por definição o processo de determinação de funções que melhor se aproximem de um conjunto de valores em análise.

Neste trabalho, as funções parametrizadas foram geradas a partir da expansão em polinômios de Tchebyshev dos coeficientes calculados em um código em linguagem FORTRAN, descrito no item 3.3.1. Para o cálculo dos coeficientes de Tchebyshev foram utilizados como dados de entrada os valores dos parâmetros de estado e de enriquecimento de $^{235}_{92}U$, que serão posteriormente apresentados, e suas respectivas seções de choque macroscópicas homogeneizadas, geradas no módulo T-NEWT a 238 grupos e colapsadas a dois grupos de energia.

3.3.1 CÁLCULO DOS COEFICIENTES DA EXPANSÃO EM POLINÔMIOS DE TCHEBYSHEV

Para uma melhor aproximação das funções resultantes da expansão em polinômios de Tchebyshev, os coeficientes de correlação são calculados de forma que a distância da função aos dados de entrada (valores das seções de choque macroscópicas homogeneizadas) seja o menor possível. Quando esse valor é mínimo, o polinômio atinge a máxima descrição da curva, ou seja, a máxima aproximação dos pontos, e neste momento o grau do polinômio é definido.

Um programa em linguagem FORTRAN foi desenvolvido para a determinação dos coeficientes de Tchebyshev necessários para a geração das funções parametrizadas, a partir da expansão dos mesmos. Para isto, foi utilizada a sub-rotina E01AEF da biblioteca NAG (*Numerical Algorithms Group*) para a construção de uma representação de polinômios de Tchebyshev de um conjunto de dados. Para os dados de entrada foram utilizados os parâmetros de estado, tal como a temperatura do combustível, a temperatura do moderador, a concentração de boro solúvel e o enriquecimento de $^{235}_{92}U$, e suas respectivas seções de choque macroscópicas homogeneizadas. O

programa foi chamado de *Determinação dos Coeficientes de Tchebyshev* e está apresentado no apêndice 11.1 deste trabalho.

Após o processamento dos coeficientes de Tchebyshev, os mesmos foram empregados na construção da expansão polinomial de Tchebyshev. Foi gerada uma função polinomial parametrizada para cada tipo de seção de choque, considerando o grupo rápido e térmico de energia.

3.3.2 EXPANSÃO EM POLINÔMIOS DE TCHEBYSHEV

O polinômio de Tchebyshev gerado a partir da expansão dos coeficientes de correlação (KROGH, 1970) é representado por:

$$f(x) = \frac{1}{2}a_0T_0(x) + a_1T_1(x) + a_2T_2(x) + \dots + a_nT_n(x), \quad (3.9)$$

onde $f(x)$ representa a seção de choque macroscópica homogeneizada, a_n é o coeficiente de correlação e $T_n(x)$ é o polinômio de Tchebyshev de primeira ordem de grau n , previamente apresentado na EQ. 3.8 do item 3.2.2 deste capítulo.

Nesta função a variável normalizada x representa o argumento, variando em um intervalo de -1 a 1, segundo a transformação linear

$$x = \frac{2X - X_{\min} - X_{\max}}{X_{\max} - X_{\min}}, \quad (3.10)$$

onde X_{\min} e X_{\max} representam, respectivamente, o valor mínimo e máximo de X no intervalo, onde X é o valor do parâmetro de estado considerado, podendo ser o valor da temperatura do combustível (T_F), temperatura do moderador (T_M), concentração de boro solúvel (C_B), ou enriquecimento de $^{235}_{92}U$ (E) utilizado [20,21]. O cálculo deste argumento serve para normalizar qualquer intervalo de valores da variável X .

3.4 PARÂMETROS DE ESTADO

Ao longo do funcionamento de um reator nuclear algumas mudanças ocorrem no núcleo. A composição se altera à medida que o urânio-235 presente no combustível fissiona, variações na temperatura do combustível e do moderador advêm devido a flutuações no fluxo de nêutrons, alterações na concentração de boro solúvel presente no moderador são feitas para regular a criticalidade do sistema, entre outros, fazem com que o comportamento da seção de choque macroscópica varie. Com intuito de estudar este comportamento da seção de choque macroscópica, frente a determinadas variáveis, fez-se a escolha de alguns parâmetros, denominados de parâmetros de estado. Estes parâmetros são definidos como um conjunto de variáveis que descrevem o estado de um sistema dinâmico. A escolha destes parâmetros leva em conta a relevância dos mesmos em relação à sensibilidade apresentada pelas seções de choque, optando por aqueles que expressem uma maior variação no comportamento das mesmas.

Neste trabalho, são considerados como parâmetros de estado a temperatura do combustível, a temperatura e densidade do moderador, a concentração de boro solúvel e o enriquecimento de $^{235}_{92}U$. Embora o enriquecimento de $^{235}_{92}U$ não seja um parâmetro de estado, ele foi considerado como variável na análise, devido o mesmo influenciar o comportamento da seção de choque e, também, o núcleo de um reator nuclear apresentar elementos combustíveis com diferentes níveis de enriquecimento. Os valores dos parâmetros de estados que foram utilizados para a geração das seções de choque macroscópicas estão apresentados na TAB. 3.1. Esses valores representam o intervalo de operação da usina nuclear de Angra II.

TAB. 3.1 Parâmetros de análise.

Parâmetro	Valor
Enriquecimento de $^{235}_{92}U$ (W/o)	2; 2,5; 3; 4 e 5
Concentração de Boro Solúvel (ppm)	250; 500; 750; 850 e 1000
Temperatura do Combustível (K)	573; 673; 973; 1273 e 1473
Temperatura do Moderador (K)	300; 400; 500; 573 e 613
Densidade do Moderador (g/cm ³)	1,003439; 0,945147; 0,842537; 0,727084 e 0,617629

O método de análise do comportamento da seção de choque macroscópica em função dos parâmetros apresentados acima, utilizado no desenvolvimento deste trabalho, considerou que as equações foram parametrizadas em função de apenas uma variável, enquanto que as demais variáveis foram mantidas fixas com valores de referência. Esses valores estão descritos na TAB. 3.2 e foram escolhidos devidos os mesmos serem utilizados no cálculo da potência máxima da usina Angra II.

TAB. 3.2 Valores de referência.

Variável	Valor de Referência
Enriquecimento de $^{235}_{92}U$	3 W/o
Concentração de Boro Solúvel	500 ppm
Temperatura do Combustível	973 K
Temperatura do Moderador	573 K
Densidade do Moderador	0,727084 g/cm ³

Após a escolha do método de parametrização, dos parâmetros de estado e dos valores de referência, o capítulo 4 apresenta o código e os módulos utilizados para o desenvolvimento das etapas necessárias para a geração das seções de choque macroscópicas. Também será descrito quais seções de choque serão analisadas e o regime de burn-up utilizado para obter a composição de cada ciclo de queima.

4 OBTENÇÃO DAS SEÇÕES DE CHOQUE MACROSCÓPICAS

4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão apresentados o código SCALE e os módulos utilizados como ferramenta para a modelagem, cálculo de queima do combustível, regime de burn-up e geração das seções de choque macroscópicas, assim como as equações provenientes da homogeneização espacial do elemento combustível e as equações das seções de choque colapsadas a dois grupos de energia. São relatadas, também, as bibliotecas de dados nucleares onde provem todas as seções de choque utilizadas nos cálculos e escolha da mesma, considerando a análise de criticalidade para os elementos combustíveis com e sem veneno queimável e o tempo de processamento.

4.2 O CÓDIGO SCALE

O código SCALE (*Standardized Computer Analysis for Licensing Evaluation*) utiliza um sistema integrado de softwares para modelar e simular a análise de segurança nuclear e design de reatores nucleares, desenvolvido, testado e gerido pela Divisão de Sistemas de Reatores Nucleares (RNSD) do Laboratório Nacional de Oak Ridge (ORNL). Por meio de uma interface simples o SCALE fornece o processamento de problemas dependentes da seção de choque, análise de segurança e criticalidade, análise e projetos de blindagem de radiação, projetos de núcleo de reatores com distribuição isotópica do combustível, visualização 3-D avançada e interface automática dos dados de entrada, e análise de sensibilidade e incertezas (SCALE, 2011).

O SCALE teve início em 1969 e é constantemente atualizado, estando atualmente na versão 6.1. Essa versão oferece uma estrutura com 89 módulos, incluindo três determinísticos e três que utilizam o método de Monte Carlo (SCALE, 2011). Devido os

módulos ser independentes, os mesmos podem ser utilizados como testes de confiabilidade do método desenvolvido.

Para o desenvolvimento do trabalho foram utilizados três módulos, sendo eles o KENO-VI, T6-DEPL e o T-NEWT, os quais serão descritos de forma sucinta nos itens subsequentes deste capítulo.

4.2.1 KENO-VI

O KENO-VI é um código de transporte que utiliza o método de Monte Carlo, empregado para a segurança de criticalidade, cujo o objetivo principal é a realização de análises do fator de multiplicação, efetivo e infinito, em projetos de licenciamento de instalações nucleares e em projetos do núcleo de reatores (FIEL, 2013). Ele também calcula o tempo de vida do reator, tempo de geração, fugas de nêutrons dependentes da energia, absorção de nêutrons em função da energia e da região, número de fissões, densidade de fluxo e densidade de fissão. O KENO-VI é uma atualização do módulo KENO, tendo como principal inovação a utilização de um pacote de formas geométricas SGGP (*SCALE Generalized Geometry Package*), que possibilita uma modelagem em três dimensões (3-D) e o emprego de um vasto conjunto de corpos geométricos (CASTRO, 2012). Ele também fornece uma ferramenta para visualização, chamado KENO3D, da geometria e de todos os materiais presentes no modelo em análise.

Neste trabalho, o KENO-VI foi utilizado para modelar e configurar os elementos combustíveis, sem e com veneno queimável, descritos no capítulo 5 desta dissertação de mestrado. Também, foi empregado na análise do fator de multiplicação para a validação dos elementos combustíveis estudados e para a escolha da biblioteca de dados nucleares utilizada ao longo do trabalho.

4.2.2 T6-DEPL

O TRITON (*T*ransport *R*igor *I*mplemented with *T*ime-dependent *O*peration for *N*eutronic depletion) é um módulo presente no SCALE, utilizado para o cálculo de transporte, depleção, preparação das seções de choque e análises de sensibilidade e incerteza aplicado para a física de reatores (SCALE, 2011). O T6-DEPL é uma das sequências de depleção provenientes do TRITON, do qual emprega o código de Monte Carlo, KENO-VI, para o cálculo de transporte. O uso do KENO-VI para o cálculo de transporte possibilita a análise em três dimensões da queima de multimateriais e multimisturas em função das seções de choque, resultantes do módulo TRITON, permitindo uma representação detalhada da distribuição de fluxo local para uma vareta de combustível específica do elemento combustível (RADELUSCU, et al. 2011). A depleção é fundamentada na conservação das taxas de reação e com integrais na região a ser queimada.

O T6-DEPL foi empregado, neste trabalho, para realizar a queima do combustível resultando na composição isotópica que servirá como composição para os ciclos subsequentes. A cada novo ciclo, uma nova composição isotópica será gerada, sendo utilizada como dados de entrada no módulo T-NEWT, que está descrito no item 3.2.3 deste capítulo.

4.2.2.1 REGIME DE BURN-UP

Para a geração das composições isotópicas dos ciclos analisados neste trabalho, foi adotado o regime de queima de 36 MW/MTU², considerando como um ciclo de queima equivalente a 11 meses de funcionamento do reator, classificado como regime padrão da usina nuclear de Angra II (ELETRONUCLEAR, 2014). A depleção do combustível será simulada no T6-DEPL do módulo TRITON.

² Em ingles, megawatts per metric ton uranium.

Embora o T6-DEPL possa gerar mais de 2000 nuclídeos, provenientes da queima do combustível, tanto detalhe não se faz necessário, devido um grande número desses nuclídeos decaírem muito rapidamente, enquanto outros não são apresentados em quantidades suficientes para influenciar o comportamento das seções de choque em análise (CASTRO, 2012), fazendo com que o tempo de processamento dos dados aumentasse consideravelmente. Sendo assim, somente foram considerados os nuclídeos com maior relevância para a reatividade do combustível, ou seja, nuclídeos com grande seção de choque de fissão e de absorção de nêutrons. Os nuclídeos selecionados foram avaliados como sendo os mais importantes na análise de segurança de criticalidade a partir da queima do combustível, em comparação com os dados disponíveis pela RCA (*Radiochemical Assay*) (RADELUSCU, et al. 2011). Devido o ^{135}Xe apresentar uma seção de choque de absorção muito elevada, o trato deste nuclídeo é feito automaticamente pelo SCALE, ou seja, o ^{135}Xe está intrínseco no código. A TAB. 4.1 apresenta os 33 nuclídeos utilizados como composição para a geração das seções de choque analisadas, sendo 17 actínídeos e 16 produtos de fissão.

TAB. 4.1 Nuclídeos selecionados resultantes da queima do combustível.

Actínídeos	$^{234}_{92}\text{U}$	$^{235}_{92}\text{U}$	$^{236}_{92}\text{U}$	$^{238}_{92}\text{U}$	$^{238}_{94}\text{Pu}$	$^{239}_{94}\text{Pu}$
	$^{240}_{94}\text{Pu}$	$^{241}_{94}\text{Pu}$	$^{242}_{94}\text{Pu}$	$^{243}_{94}\text{Pu}$	$^{241}_{95}\text{Am}$	$^{242}_{95}\text{Am}^*$
	$^{243}_{95}\text{Am}$	$^{242}_{96}\text{Cm}$	$^{243}_{96}\text{Cm}$	$^{244}_{96}\text{Cm}$	$^{245}_{96}\text{Cm}$	—
Produtos de Fissão	$^{95}_{42}\text{Mo}$	$^{99}_{43}\text{Tc}$	$^{101}_{44}\text{Ru}$	$^{103}_{45}\text{Rh}$	$^{109}_{47}\text{Ag}$	$^{133}_{55}\text{Cs}$
	$^{143}_{60}\text{Nd}$	$^{145}_{60}\text{Nd}$	$^{147}_{62}\text{Sm}$	$^{149}_{62}\text{Sm}$	$^{150}_{62}\text{Sm}$	$^{151}_{62}\text{Sm}$
	$^{152}_{62}\text{Sm}$	$^{153}_{63}\text{Eu}$	$^{155}_{64}\text{Gd}$	$^{16}_{8}\text{O}$	—	—

4.2.3 T-NEWT

NEWT (*New ESC-based Weighting Transport Code*) é um código de transporte bidimensional (2-D), proveniente do módulo TRITON, que se baseia na técnica de discretização ESC (*Extended Step Characteristic*). A aproximação ESC foi desenvolvida para a solução do método de ordenadas discretas em geometrias complicadas que

possuem configurações irregulares, a partir da equação de transporte de Boltzmann, chamada também de equação de transporte de nêutrons (SCALE, 2011).

Em geral, a equação de transporte de nêutrons é muito complexa dificultando sua aplicação e pode ser resolvida analiticamente somente em casos altamente idealizados. Sendo assim, simplificações e aproximações são muitas vezes necessárias. Tradicionalmente, métodos das ordenadas discretas são baseados em uma aproximação utilizando diferenças finitas para a solução da fuga de nêutrons. O método das diferenças finitas está intimamente ligado ao sistema de coordenadas no qual os mesmos são desenvolvidos, tornando-se difícil representar volumes não ortogonais dentro desse sistema de coordenadas. No entanto, a abordagem ESC discretiza as células permitindo a utilização de células computacionais não ortogonais compostas de polígonos arbitrários. Usando este método, praticamente qualquer forma pode ser representada dentro de uma grade cartesiana para uma boa aproximação.

NEWT fornece múltiplos recursos que podem ser usados em uma ampla variedade de áreas de aplicações. O módulo T-NEWT, neste trabalho, é responsável pela homogeneização e colapso das seções de choque analisadas.

4.2.3.1 CÁLCULO DE HOMOGENEIZAÇÃO

O núcleo de um reator nuclear do tipo PWR não é regular, sendo composto por diversos elementos heterogêneos, como por exemplo, o elemento combustível presente em diferentes estágios de enriquecimento, o moderador que apresenta densidades distintas ao longo do funcionamento do reator, barras de controle que modificam a distribuição das densidades de potências, entre outros. Essas irregularidades são usualmente tratadas a partir de cálculos de difusão multigrupo e sendo necessária a homogeneização espacial das regiões heterogêneas.

A ideia é basicamente realizar um cálculo da distribuição detalhada do fluxo numa dada unidade celular da malha, geralmente assumindo que existe corrente líquida de nêutrons igual a zero como condição de contorno da célula (usando argumentos com

base na simetria da malha). É feito então o cálculo da média espacial das várias seções de choque multigrupo que caracterizam os materiais na célula ao longo da mesma, utilizando-se a distribuição do fluxo como uma função de ponderação. Desta forma pode-se caracterizar a célula pelas constantes de grupo efetivas que representam a distribuição do fluxo não homogêneo na célula. Sendo assim, é feita a substituição da unidade da célula real por uma unidade homogênea da célula equivalente, caracterizada por estas seções de choque. Esse esquema é feito tanto para a célula de combustível como para o elemento combustível e o reator como um todo, conforme é apresentado na FIG. 4.1, onde a partir da conservação dos volumes e das taxas de reação é feita a redução dos mesmos para uma célula equivalente com geometria simples para facilitar os cálculos.

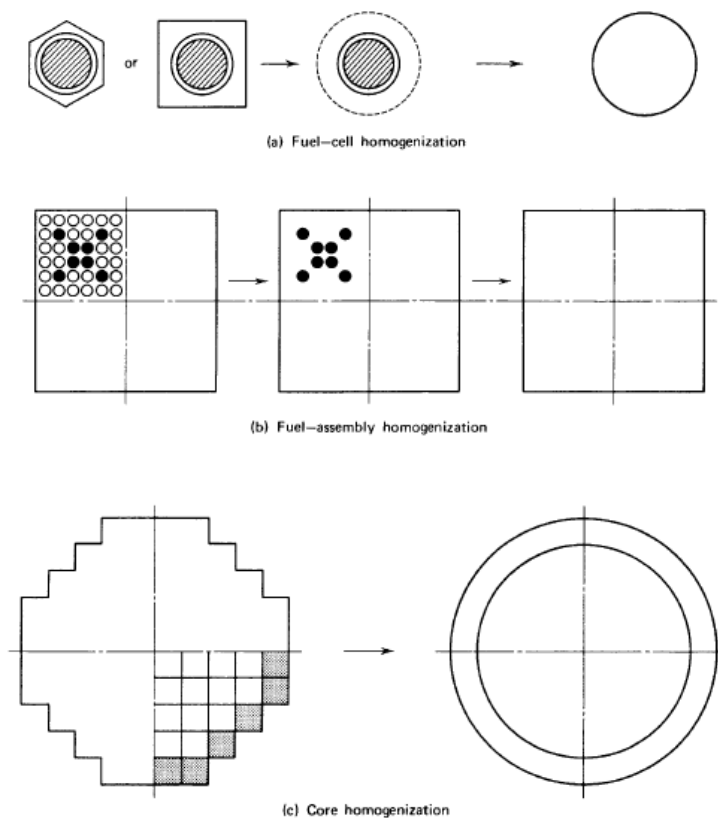


FIG. 4.2 Tipos de homogeneização (DUDERSTADT E HAMILTON, 1976).

As seções de choque para a mistura e para uma zona homogeneizada são processadas no módulo T-NEWT, onde são modeladas sobre o domínio do espaço e da energia. Nos cálculos das seções de choque a conservação das taxas de reação é

preservada em todo o processo, isto é,

$$\sigma_{i,G}^i = \frac{\int_r N^i(r) dr \int_G \sigma^i(r,E) W(r,E) dE}{\int_r N^i(r) dr \int_G W(r,E) dE} \quad (4.1)$$

onde $\sigma_{i,G}^i$ é a seção de choque média ou efetiva em um grupo de energia G para o nuclídeo i , $N^i(r)$ é o “number density” de um nuclídeo i na região r , $W(r,E)$ é a função de ponderação dentro da região r e $\sigma^i(r,E)$ é a seção de choque original do input da biblioteca para o nuclídeo i na região r .

A ponderação é sempre usada em conjunto com a colapso da energia e cada região colapsada é a região espacial na qual uma dada mistura é colocada. Então, para muitos tipos de seções de choque, uma seção de choque média para uma mistura associada com o domínio espacial r é calculada pela ponderação dos dados da seção de choque específica do problema para que a mistura use como uma função de ponderação o fluxo de nêutrons calculado dentro do domínio espacial r , a qual pode incluir uma ou mais regiões ocupadas para esta mistura. Então, a EQ. 3.1 pode ser solucionada ao realizar uma simples soma sobre todas as células j dentro da região r :

$$\sigma_{i,G} = N_r^i \sum_{j \in r} \sum_{g \in G} \sigma_{g,j}^i W_{g,j} / N_r^i \sum_{j \in r} \sum_{g \in G} W_{g,j} \quad (4.2)$$

onde N_r^i é constante para todas as regiões dentro de r , devido qualquer região r ser definida como a soma de todas as regiões espaciais contendo uma dada mistura.

Todas as seções de choque multigrupo e dados relatados presentes na biblioteca AMPX (MCNP, 2003) são ponderadas usando-se as funções de ponderação apropriadas, como descritas na TAB. 4.4. Para muitas seções de choque básicas, o fluxo obtido da equação de transporte é a função de ponderação apropriada, e $W_{g,r}$ na EQ. 3.2 torna-se $\phi_{g,r}$.

Entretanto, a forma da ponderação da seção de choque de espalhamento é mais complexa:

$$\sigma_{s,G \rightarrow G'}^i = \frac{\int_r N^i(r) dr \int_G W(r,E) dE \int_{G'} \sigma^i(r, E \rightarrow E') dE'}{\int_r N^i(r) dr \int_G W(r,E) dE} \quad (4.3)$$

ou em formato multigrupo,

$$\sigma_{s,G \rightarrow G'}^i = N_r^i \sum_{j \in r} \sum_{g \in G} W_{g,r} \sum_{g' \in G'} \sigma^i(g \rightarrow g') / N_r^i \sum_{j \in r} \sum_{g \in G} W_{g,r} \quad (4.4)$$

Em geral, o fluxo escalar $\phi_{g,r}$ é a função apropriada para a seção de choque de espalhamento:

$$\sigma_{s,G}^i = N_r^i \sum_{j \in r} \sum_{g \in G} \sigma_{g,r}^i \phi_{g,r} / N_r^i \sum_{j \in r} \sum_{g \in G} \phi_{g,r} \quad (4.5)$$

Conhecendo as funções de ponderação, as constantes de grupo caracterizadas pelas seções de choque podem ser escritas de forma genérica por:

$$\langle \Sigma_{xg} \rangle_{Cell} = \frac{\int_{V_{Cell}} \int_{E_g}^{E_{g-1}} \Sigma_x(r, E) \phi(r, E) d^3r dE}{\int_{V_{Cell}} \int_{E_g}^{E_{g-1}} \phi_g(r, E) d^3r dE} \quad (4.6)$$

onde $g = 1, 2, 3, \dots, G$ é o índice do grupo de energia, Σ_{xg} representa as seções de choque macroscópicas Σ_f , Σ_T , Σ_c , $\nu\Sigma_f$ e Σ_{tr} , e ϕ_g é o fluxo de nêutrons. A forma discretizada das seções de choque macroscópicas provenientes da EQ. 3.6, considerando duas regiões da célula, sendo uma região do combustível (F) e uma do moderador (M), são escritas da seguinte forma:

$$\langle \Sigma_{xg} \rangle_{Cell} = \frac{V_M \int_{E_g}^{E_{g-1}} \Sigma^M(E) \bar{\phi}_M(E) dE + V_F \int_{E_g}^{E_{g-1}} \Sigma^F(E) \bar{\phi}_F(E) dE}{V_M \int_{E_{g'}}^{E_{g'-1}} \bar{\phi}_M(E) dE + V_F \int_{E_{g'}}^{E_{g'-1}} \bar{\phi}_F(E) dE} \quad (4.7)$$

Para a seção de choque de espalhamento escreve-se a seguinte equação:

$$\langle \Sigma_{sg'g} \rangle_{Cell} = \frac{\int_{V_{cell}} \int_{E_g}^{E_{g-1}} dE \int_{E_{g'}}^{E_{g'-i}} \Sigma_s(r, E' \rightarrow E) \phi(r, E') d^3r dE'}{\int_{V_{cell}} \int_{E_{g'}}^{E_{g'-i}} \phi_{g'}(r, E') d^3r dE'} \quad (4.8)$$

Considerando duas regiões da célula, combustível e moderador, a seção de choque de espalhamento discretizada, escrita a partir da EQ. 3.8 é dada por:

$$\langle \Sigma_{sg'g} \rangle_{Cell} = \frac{V_M \int_{E_g}^{E_{g-1}} dE \int_{E_{g'}}^{E_{g'-i}} \Sigma_s(E' \rightarrow E) \bar{\phi}_M(E') dE' + V_F \int_{E_g}^{E_{g-1}} dE \int_{E_{g'}}^{E_{g'-i}} \Sigma_s(E' \rightarrow E) \bar{\phi}_F(E') dE'}{V_M \int_{E_{g'}}^{E_{g'-i}} \bar{\phi}_M(E') dE + V_F \int_{E_{g'}}^{E_{g'-i}} \bar{\phi}_F(E') dE} \quad (4.9)$$

Os fluxos de nêutrons médios do combustível e do moderador, representados por $\bar{\phi}_F$ e $\bar{\phi}_M$, respectivamente, tanto na EQ. 3.7 e 3.9 são dados por:

$$\bar{\phi}_F(E) = \frac{1}{V_F} \int_{V_F} \phi(r, E) d^3r \quad (4.10)$$

e

$$\bar{\phi}_M(E) = \frac{1}{V_M} \int_{V_M} \phi(r, E) d^3r \quad (4.11)$$

As constantes a poucos grupos de energia, calculadas para a célula de combustível podem ser usadas para descrever a maior parte do *assembly*, com exceção dos materiais de controle que requerem técnicas especiais. O módulo T-NEWT é usado para determinar o fluxo em cada célula, e esses fluxos são utilizados para a geração das constantes de grupo média em todo o elemento combustível. A FIG. 4.2 apresenta de forma esquematizada a geração das constantes de grupo das seções de choque macroscópicas

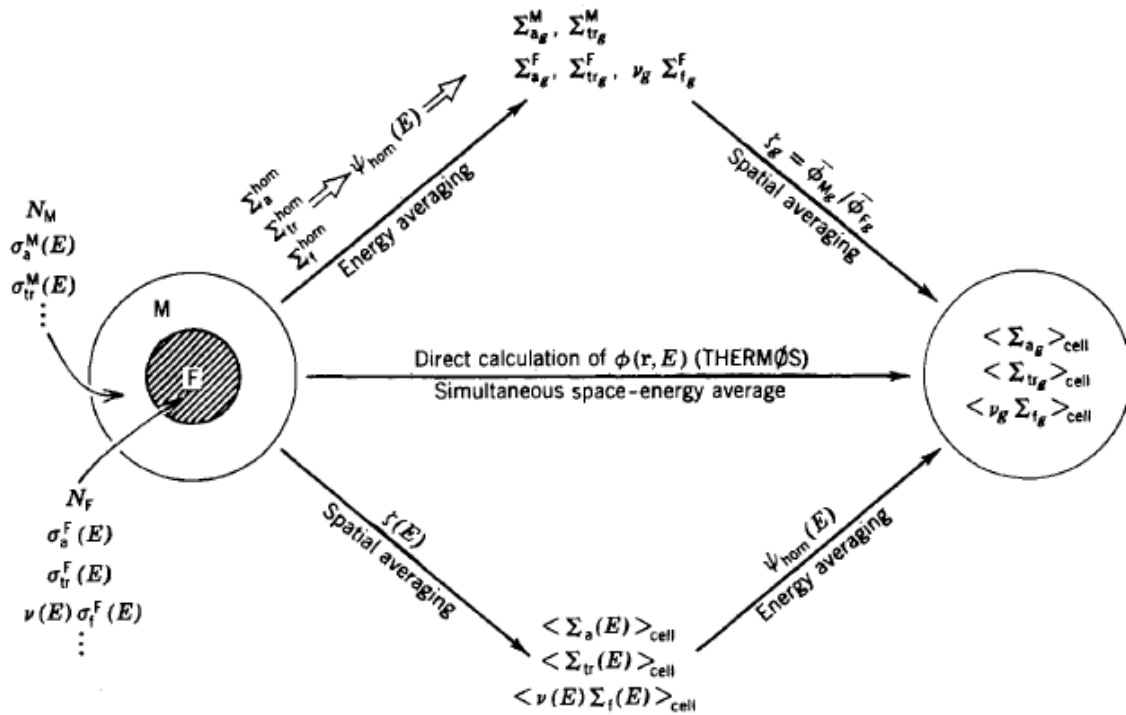


FIG. 4.3 Geração das constantes de grupo das seções de choque macroscópicas (DUDERSTADT E HAMILTON, 1976).

4.2.3.2 CÁLCULO DE COLAPSAÇÃO

A colapso de 238 grupos para 2 grupos de energia foi feita considerando-se os 199 primeiros grupos de energia como pertencente a faixa rápida e os 39 grupos de energia restantes como pertencentes a faixa térmica de energia, tendo a sua energia de corte definida em 0,625 eV. A estrutura dos grupos de energia está apresentada no apêndice 11.2 deste trabalho. As equações de colapso são escritas de acordo com a conservação das taxas de reação, dada pelo produto da seção de choque macroscópica, para cada tipo de seção de choque, pelo fluxo de nêutrons, ou seja,

$$\Sigma_{x,g}(r)\Phi_g \equiv \frac{1}{v} \int_{E_g}^{E_{g-1}} \Sigma_x(r, E)\phi(r, E)d^3 r dE \quad (4.12)$$

onde Φ é o fluxo total de nêutrons.

As equações colapsadas das seções de choque, tanto para o grupo rápido quanto

para o grupo térmico de energia, sem incluir a seção de choque de espalhamento, são escritas conforme:

i) Grupo rápido de energia:

$$\Sigma_{x1} = \frac{\sum_{g=1}^{199} \Sigma_{xg} \Phi_g}{\sum_{g=1}^{199} \Phi_g} \quad (4.13)$$

ii) Grupo térmico de energia:

$$\Sigma_{x2} = \frac{\sum_{g=200}^{238} \Sigma_{xg} \Phi_g}{\sum_{g=200}^{238} \Phi_g} \quad (4.14)$$

onde $g = 1, 2, 3, \dots, G$ é o índice do grupo de energia, Σ_{xg} representa as seções de choque macroscópicas Σ_f , Σ_T , Σ_c , $\nu\Sigma_f$ e Σ_{tr} , e Φ_g é o fluxo total de nêutrons.

Para a seção de choque de espalhamento são escritas as seguintes equações:

i) Espalhamento do grupo 1 para o próprio grupo 1 (Σ_{S11})

$$\Sigma_{S11} = \frac{\sum_{g=1}^{199} \sum_{g'=1}^{199} \Sigma_{Sg'g} \Phi_{g'}}{\sum_{g'=1}^{199} \Phi_{g'}} \quad (4.15)$$

ii) Espalhamento do grupo 1 para o grupo 2 (Σ_{S12})

$$\Sigma_{S12} = \frac{\sum_{g=1}^{199} \sum_{g'=200}^{238} \Sigma_{Sg'g} \Phi_{g'}}{\sum_{g'=1}^{199} \Phi_{g'}} \quad (4.16)$$

iii) Espalhamento do grupo 2 para o próprio grupo 2 (Σ_{S22})

$$\Sigma_{S22} = \frac{\sum_{g=200}^{238} \sum_{g'=200}^{238} \Sigma_{Sg'g} \Phi_{g'}}{\sum_{g'=200}^{238} \Phi_{g'}} \quad (4.17)$$

Neste trabalho, não se considerou a ocorrência de *upscattering*, logo o espalhamento do grupo 2 para o grupo 1 é igual a zero, ou seja, $\Sigma_{S_{21}} = 0$.

4.2.4 DIAGRAMA DO PROCESSO DE OBTENÇÃO DAS SEÇÕES DE CHOQUE MACROSCÓPICAS

O diagrama de blocos apresentado na FIG. 4.3 representa, esquematicamente, todo o processo de obtenção dos dados de seção de choque e k_{inf} que foram analisados ao longo deste trabalho.

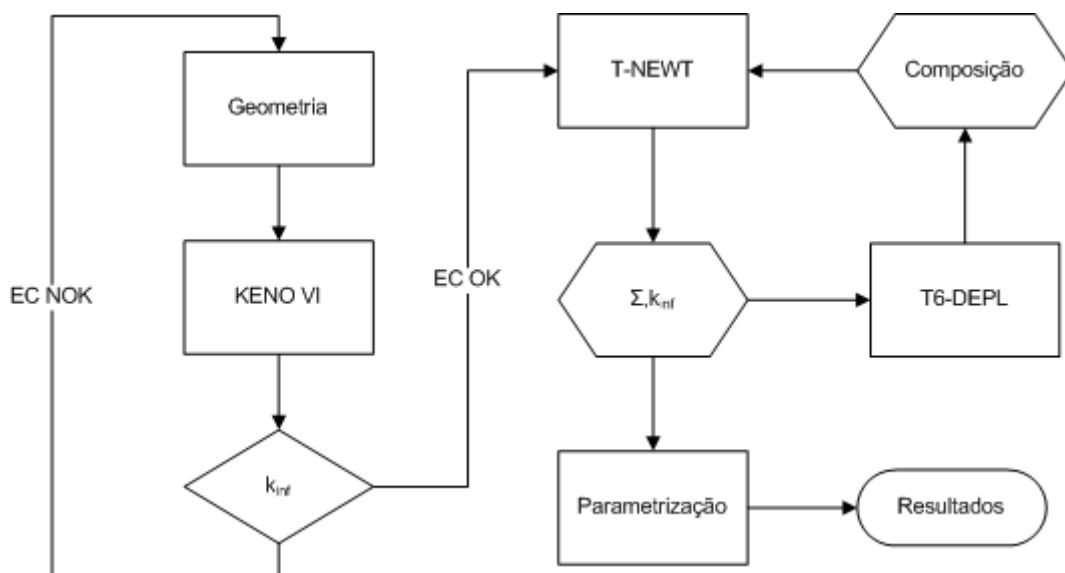


FIG. 4.4 Diagrama de blocos do processo de obtenção das seções de choque.

Primeiramente obtiveram-se os dados da geometria e configuração do elemento combustível, sem e com veneno queimável, provenientes do FSAR de Angra II. O módulo KENO VI foi empregado para modelar e simular os elementos combustível, utilizando a composição padrão (composição ciclo zero), apresentada no capítulo 5. A análise do resultado de k_{inf} , gerado pelo mesmo, serviu como verificação do EC modelado. Dando continuidade ao trabalho, utilizou-se o módulo T-NEWT para homogeneização, colapso e geração das seções de choque e k_{inf} em análise. Os

dados gerados foram parametrizados, a partir do método dos polinômios de Tchebyshev, dando origem aos resultados do ciclo zero.

A composição padrão usada para a geração dos resultados do ciclo zero serviram como input no módulo T6-DEPL, responsável pela queima do combustível gerando uma nova composição, a composição do ciclo 1. A nova composição é então empregada no módulo T-NEWT para a geração das seções de choque e k_{inf} em análise.

A cada novo ciclo o processo se repete, tendo ao fim, seções de choque e k_{inf} referente aos ciclos zero, um, dois e três. Este processo foi utilizado tanto para o elemento combustível sem e com veneno queimável. Foi simulado uma vez para cada parâmetro de análise, apresentado na TAB. 3.1, enquanto os outros valores eram mantidos fixos como valores de referência. Ao todo foram 190 simulações, sendo 160 com o T-NEWT e 30 com o T6-DEPL.

4.3 SEÇÕES DE CHOQUE EM ANÁLISE

As seções de choque e k_{inf} gerados a partir das simulações feitas no módulo T-NEWT, serão parametrizadas conforme descrito anteriormente no capítulo 3, seção 3.3. As seções de choque macroscópicas analisadas estão apresentadas na FIG. 4.4.

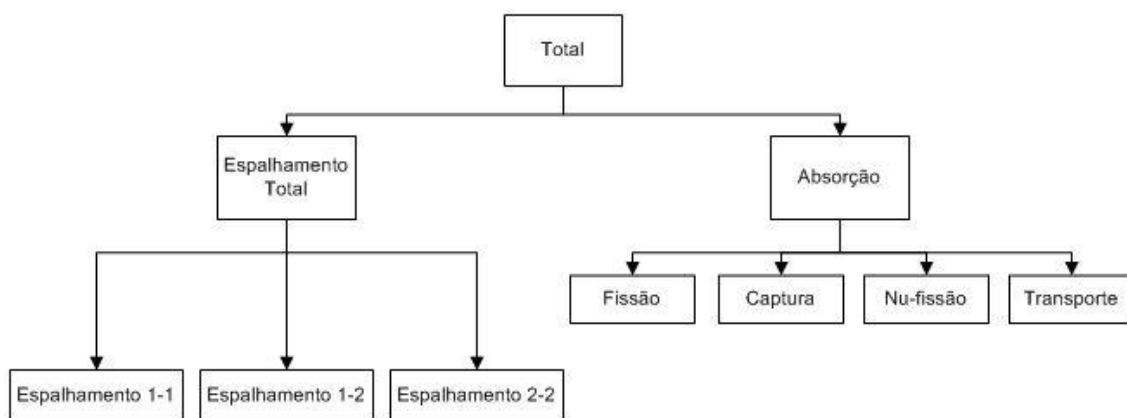


FIG. 4.5 Seções de choque em análise.

Foram analisadas, além do fator de multiplicação infinito, 10 seções de choque macroscópicas em 4 ciclos (ciclo zero e mais 3 ciclos de queima), considerando 4 variáveis: temperatura do combustível, temperatura e densidade do moderador, concentração de boro solúvel e enriquecimento de urânio; tanto para o elemento sem e com veneno queimável, resultando em 576 parametrizações.

4.4 BIBLIOTECA DE DADOS NUCLEARES

Os dados nucleares são resultados quantitativos de pesquisas científicas das propriedades nucleares da matéria. Eles descrevem as propriedades atômicas dos núcleos e as relações físicas fundamentais que regem suas interações, caracterizando, assim, o processo físico que fundamenta todas as tecnologias nucleares. Os dados nucleares incluem as seções de choque, meia-vida dos núclídeos, modelos e propriedades dos decaimentos radioativos, e as radiações gama provenientes dos decaimentos (SCHWERER, 2001). O emprego dos dados nucleares abrangem todas as áreas das ciências e tecnologia nuclear, desde as aplicações em energia (design de reatores de fissão, ciclos do combustível nuclear, segurança nuclear, cálculos de fluxo) e aplicações não energéticas (radioterapia, produção de radioisótopos para uso em medicina e aplicações na indústria, dosimetria e segurança radioativa, detectores).

Os dados nucleares são categorizados em dois grupos principais: dados de reações nucleares, os quais descrevem as interações dos nêutrons, prótons ou fótons com núcleos alvos; e “estruturas nucleares e dados de decaimentos”, os quais apresentam as meia-vidas dos elementos e as radiações provenientes dos decaimentos radioativos. Para os dois grupos apresentados, os dados podem ser fornecidos a partir de uma biblioteca contendo dados experimentais, ou seja, dados fornecidos para serem testados resultando em dados não oficiais (ENDF/A) e bibliotecas com dados avaliados, ou seja, oficiais (ENDF/B) (HONECK, 1966).

Os dados nucleares avaliados são armazenados em formato ENDF (*Evaluated Nuclear Data File*), desenvolvido e periodicamente atualizados pelo CSEWG (*Cross Section Evaluation Working Group*) e disponibilizado pela NRDC (*International Network*

of *Nuclear Reaction Data Centres*). O formato ENDF reúne os dados das principais bibliotecas mundiais, sendo elas: *Evaluated Nuclear Data File* (ENDF, Estados Unidos e Canadá), *Joint Evaluated Fission and Fusion File* (JEFF, União Européia), *Japanese Evaluated Nuclear Data Library* (JENDL, Japão), *China Evaluated Nuclear Data Library* (CENDL, China) e *Library of Recommended Evaluated Neutron Data* (BROND, Rússia) (IAEA, 2014).

O sistema SCALE 6.1 processa os dados nucleares de seções de choque provenientes da biblioteca ENDF/B, utilizando a versão ENDF/B-VII.0 como base (CHADWICK, 2011). Nesta biblioteca a seção de choque pode ser representada pela real especificação dos parâmetros de ressonância (região de ressonância resolvida), ou podem ser dadas em pontos de energia discretos com uma regra de interpolação especificada. As seções de choque podem ser dadas como uma soma de contribuição dessas representações.

4.4.1 ESCOLHA DA BIBLIOTECA DE DADOS NUCLEARES

A escolha da biblioteca de seção de choque adequada se faz necessário devido à mesma influenciar na precisão dos cálculos efetuados pelo código SCALE. Para isto, foi feita uma análise comparativa dos valores médios calculados, a partir do uso das bibliotecas *v7-238* (biblioteca de 238 grupos) e *CE_v7_ENDF* (biblioteca de energia contínua), das criticalidades e dos tempos de processamento.

A análise foi feita a partir do elemento combustível com e sem veneno queimável, utilizando os parâmetros usados como valores de referência, definidos na TAB. 3.2 do capítulo 3, e considerando as mesmas configurações padrão apresentada no capítulo 5. Os resultados dos tempos de processamento do SCALE e os fatores de multiplicação infinitos para o elemento combustível sem e com veneno queimável, estão apresentados nas TAB. 4.2 e 4.3, respectivamente.

TAB. 4.1 Comparação entre as bibliotecas v7-238 e ce_v7_endf para o EC sem veneno queimável.

KENO VI	Biblioteca	k_{inf}	Tempo de Processamento
Multigrupo	v7-238	1,01325 ± 0,00016	12,98 minutos
Energia Contínua	ce_v7_endf	1,01344 ± 0,00025	41,42 minutos

TAB. 4.2 Comparação entre as bibliotecas v7-238 e ce_v7_endf para o EC com veneno queimável.

KENO VI	Biblioteca	k_{inf}	Tempo de Processamento
Multigrupo	v7-238	0,90036 ± 0,00017	12,83 minutos
Energia Contínua	ce_v7_endf	0,90017 ± 0,00026	42,35 minutos

Ao analisar o fator de multiplicação infinito (k_{inf}) do elemento combustível sem veneno queimável em comparação ao elemento combustível com veneno queimável fica claro o aumento da absorção dos nêutrons e, conseqüentemente, a diminuição do número de fissões, resultando em uma redução do k_{inf} provocado pela presença do material absorvedor Gd_2O_3 .

Devido a semelhança e proximidade dos resultados do k_{inf} apresentados, tanto para o EC sem veneno queimável e o EC com veneno queimável, e para otimizar o tempo de análise, decidiu-se pelo uso da biblioteca 238-group ENDF/B-VII.0 (v7-238). Essa biblioteca de seções de choque é referenciada como sendo a biblioteca mestre do SCALE.

O valor das seções de choque apresentadas na biblioteca escolhida leva em conta a faixa de energia que está sendo analisada, onde o método utilizado para a geração dos vários espectros de energia depende do intervalo de energia dos nêutrons. Para energias abaixo de 1 eV o fluxo de nêutrons é aproximado pela distribuição de Maxwell-Boltzman, onde o *upscattering* se torna apreciável com os nêutrons tendendo a se aproximar do equilíbrio térmico com o núcleo do reator na temperatura T . Para energias intermediárias, entre 1 eV e 1 MeV, o fluxo varia com $1/E$ e a ressonância de absorção se torna muito importante. Já para as altas energias, ou seja, energias acima de 1 MeV, o fluxo pode ser aproximado ao espectro de fissão, onde o processo

dominante é a moderação via espalhamento elástico e inelástico (DUDERSTADT E HAMILTON, 1976). Essas funções padrão estão listadas na TAB. 4.4, e são utilizadas para processar os dados de multigrupo para todos os materiais em 238 grupos. As seções de choque são obtidas a partir das médias dos pontos de seção de choque usando essas funções de ponderação padrão. A estrutura dos grupos de energia que foram utilizadas neste trabalho está apresentada no apêndice 11.2.

TAB. 4.3 Funções de ponderação padrão para o processamento de dados multigrupo.

Intervalo de Energia	Função Peso Padrão
10^{-5} eV – 0,1 eV	Maxwelliana com pico em 0,0025 eV
0,1 eV – 80 keV	1/E
80 keV – 10 MeV	Espectro de Fissão de Watt na temperatura de 1273 K
10 MeV – 20 MeV	1/E

Os fatores de blindagem Bondarenko para a biblioteca v7-238 são computados usando-se a aproximação de ressonância estreita (NR) para o espectro do fluxo:

$$\Phi_{NR}(E) = \frac{\sigma_0}{(\sigma_t + \sigma_0)}, \quad (4.18)$$

onde σ_0 é a seção de choque de fundo. Os fatores de blindagem Bondarenko são tabelados nas temperaturas de 293, 900 e 1200 K na biblioteca de 238 grupos.

A partir da descrição do código SCALE e dos seus módulos, assim como a escolha da biblioteca de seções de choque, o próximo capítulo descreverá os elementos combustíveis que serão modelados e posteriormente simulados a fim de obter os dados necessários para a parametrização das seções de choque.

5 DESCRIÇÃO DOS ELEMENTOS COMBUSTÍVEIS TRATADOS

5.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados, descritos e modelados os elementos combustíveis (EC), sem e com veneno queimável, tratados no código SCALE, tendo como referência às especificações de um EC típico de um reator PWR (WESTINGHOUSE ELECTRIC CORPORATION, 1984), sendo as composições isotópicas e as configurações geométricas definidas pelas informações obtidas do FSAR (Relatório Final de Análise de Segurança) de ANGRA 2 (ANGRA II, 1999).

Para a modelagem da geometria e configuração dos elementos combustíveis utilizou-se o módulo KENO-VI, que trabalha em três dimensões (3-D) e processa cálculos de criticalidade do reator empregando o método de Monte Carlo.

Posteriormente, foi empregado o módulo TRITON que utiliza uma aplicação de transporte em 2D (duas dimensões), tendo o NEWT como responsável pelo processamento das seções de choque e homogeneização da mistura, assim como, a preparação das concentrações isotópicas (*Number Densities*) e cálculo do fluxo de nêutrons.

A partir do resultado da análise de criticalidade do reator, tanto para o elemento combustível com e sem veneno queimável, pode-se verificar a validade da geometria, configuração e composição do elemento combustível, determinando a continuidade do trabalho.

As análises dos elementos combustíveis, sem e com veneno queimável, foram processadas a 238 grupos de energia, sendo os mesmos colapsados a dois grupos. O grupo rápido foi definido pelos primeiros 199 grupos enquanto o grupo térmico foi definido pelos 39 grupos restantes. Foi considerado como energia de corte o valor de 0,625 eV. A estrutura dos grupos de energia é descrita no apêndice 11.2, desta dissertação de mestrado.

5.2 ELEMENTO COMBUSTÍVEL SEM VENENO QUEIMÁVEL

Após o estudo das bibliotecas de seções de choque e posterior escolha da utilização da biblioteca “238-group ENDF/B-VII.0” (V7-238), iniciou-se a modelagem do elemento combustível sem veneno queimável, ou seja, um elemento combustível sem a presença de varetas contendo material absorvedor de nêutrons.

Para esta análise, a composição isotópica definida é formada por três misturas alocadas em duas regiões de célula distintas, representada pela FIG 5.1, em 2D (duas dimensões), modelada no módulo T-NEWT. Nesta figura, os cuboides roxos com cilindros em rosa representam as varetas de combustível padrão e os cuboides roxos com cilindros em azul simbolizam os tubos guia. Na composição básica padrão as misturas foram definidas como:

- Mistura 01: Combustível – UO_2 ($^{235}_{92}U + ^{238}_{92}U$);
- Mistura 02: Moderador – Água Borada ($H_2O + B^{10}$);
- Mistura 03: Estrutura – Zircaloy-4.

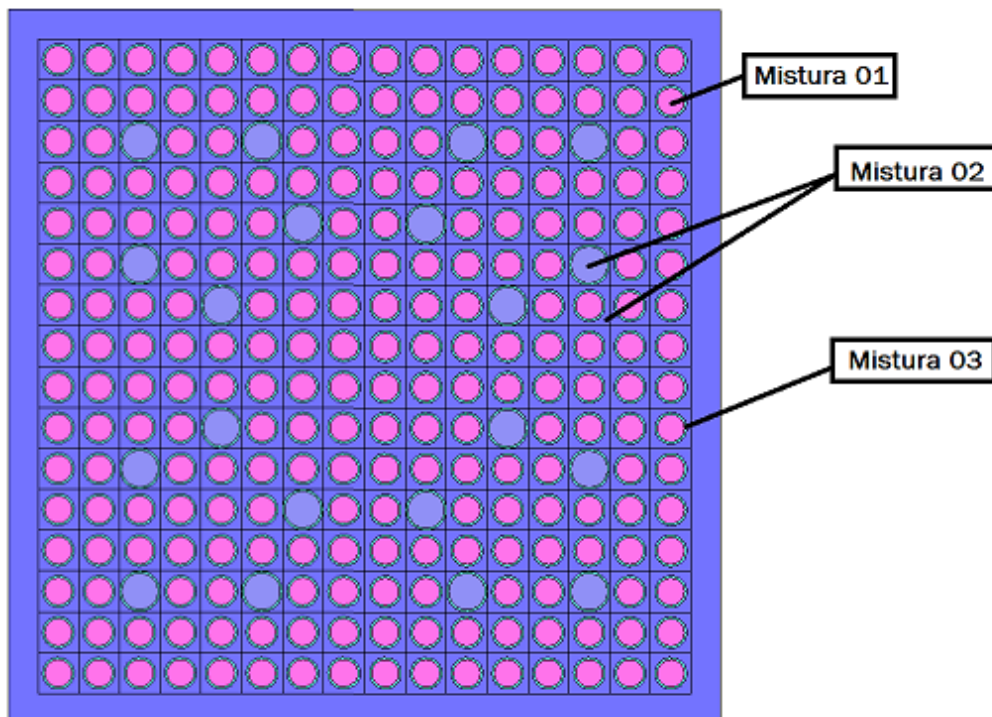


FIG. 5.1 Elemento combustível sem veneno queimável - Vista Superior.

A primeira região é formada pelas varetas de combustível, constando de células quadráticas formadas por cuboides de água borada, contendo em seu interior, cilindros concêntricos estruturados por zircaloy-4, possuindo UO_2 enriquecido em 3% de $^{235}_{92}U$.

A segunda região representa os tubos guia, sendo construída de células quadráticas formadas por cuboides de água borada contendo no seu interior, cilíndricos concêntricos estruturados por zircaloy-4, possuindo água borada.

O elemento combustível sem veneno queimável é representado na FIG. 5.2, em vista 3D (três dimensões), modelado no módulo KENO-VI do código SCALE.

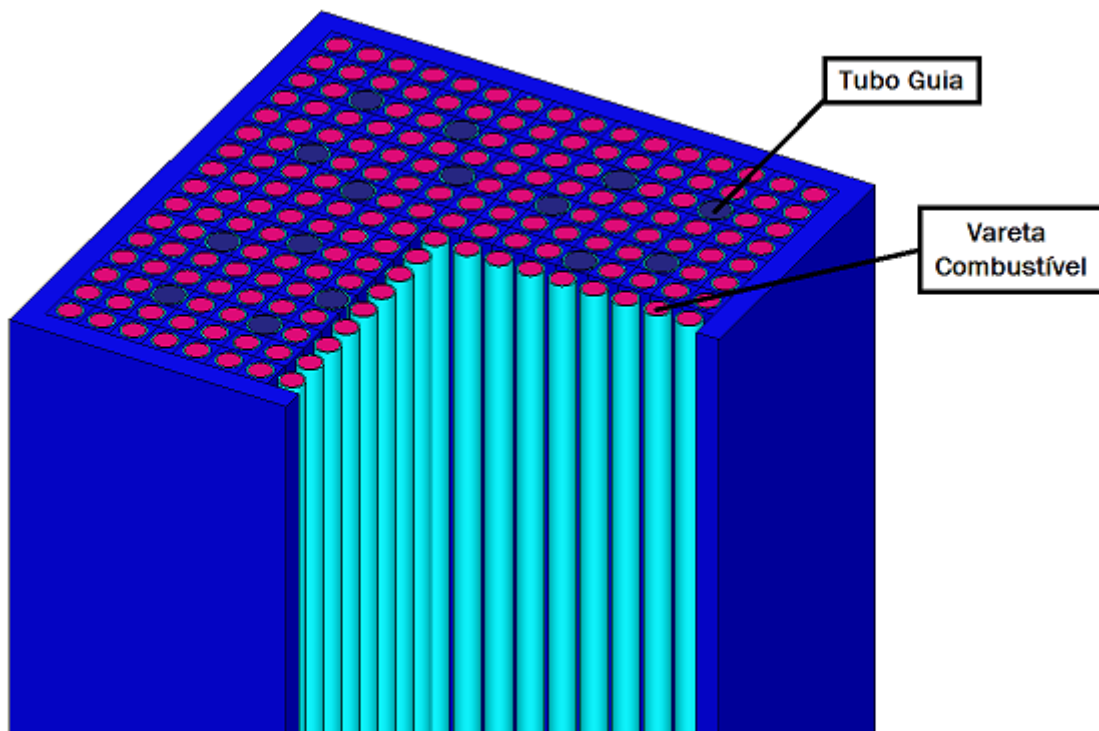


FIG. 5.2 Elemento combustível sem veneno queimável - Vista 3D.

O elemento combustível é do tipo 16x16, tendo 236 varetas de combustível, com "Pitch" de 14,3 mm e somando uma massa de 616 kg de UO_2 , por elemento combustível.

As varetas de combustível têm um comprimento ativo de 390 cm, possuindo 4,555 mm de raio do "Pellet", 4,650 e 5,375 mm de raio interno e raio externo do "Clad", respectivamente. O "Clad" é constituído de zircaloy-4 e está presente nas 236 varetas de combustível somando 138,7 kg em comprimento ativo.

Os tubos guias têm dimensões de 6,2 e 6,9 mm de raio interno e externo, respectivamente. Esta configuração é formada por 20 tubos guia estruturados de zircaloy-4, tendo a sua massa total, em comprimento ativo, de 14,8 kg.

5.3 ELEMENTO COMBUSTÍVEL COM VENENO QUEIMÁVEL

O elemento combustível com veneno queimável tem sua composição isotópica formada por quatro misturas pertencentes a três regiões de célula distintas, representada pela FIG. 5.3, onde os cuboides roxos com cilindros em rosa representam as varetas de combustível padrão, os cuboides roxos com cilindros em azul simbolizam os tubos guia e os cuboides roxos com cilindros em verde representam as varetas combustíveis com material absorvedor de Gd_2O_3 . Na composição básica padrão as misturas foram definidas como:

- Mistura 01: Combustível – UO_2 ($^{235}_{92}U + ^{238}_{92}U$);
- Mistura 02: Moderador – Água Borada ($H_2O + B^{10}$);
- Mistura 03: Estrutura – Zircaloy-4;
- Mistura 04: Combustível com Material Absorvedor – $UO_2 + Gd_2O_3$

A escolha da configuração do elemento combustível com veneno queimável possuindo 12 varetas absorvedoras de nêutrons (U/Gd), com a composição de $^{235}_{92}U/Gd_2O_3$ w/o : 0.71/7.0 (ANGRA II, 1999), se deu para se obter uma diferenciação maior de resultados em relação ao elemento combustível descrito no item 5.2.

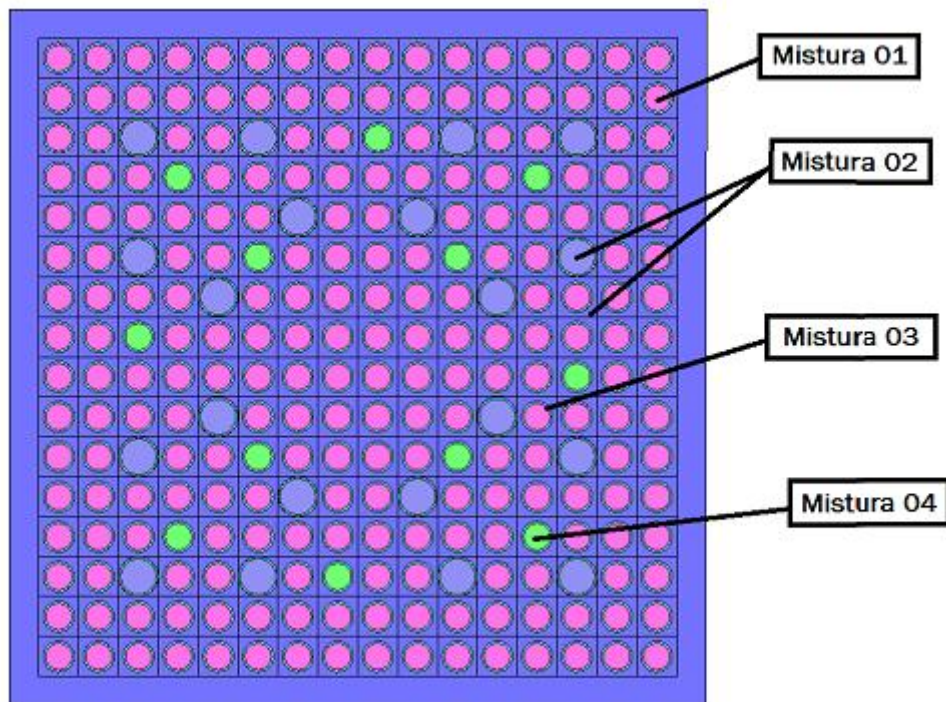


FIG. 5.3 Elemento combustível com veneno queimável - Vista Superior.

A descrição da primeira e a segunda região, assim como a descrição geométrica do elemento combustível é análoga ao elemento combustível sem veneno queimável, sendo apenas complementada pela terceira região, constituído pelo combustível com material absorvedor.

A terceira região representa as varetas absorvedoras, sendo constituída de células quadráticas formadas por cuboides de água borada contendo no seu interior, cilíndricos concêntricos estruturados por zircaloy-4, possuindo uma mistura de $UO_2 + Gd_2O_3$.

O elemento combustível com veneno queimável é representado na FIG. 5.4, em vista 3D (três dimensões), modelado no módulo KENO-VI do código SCALE.

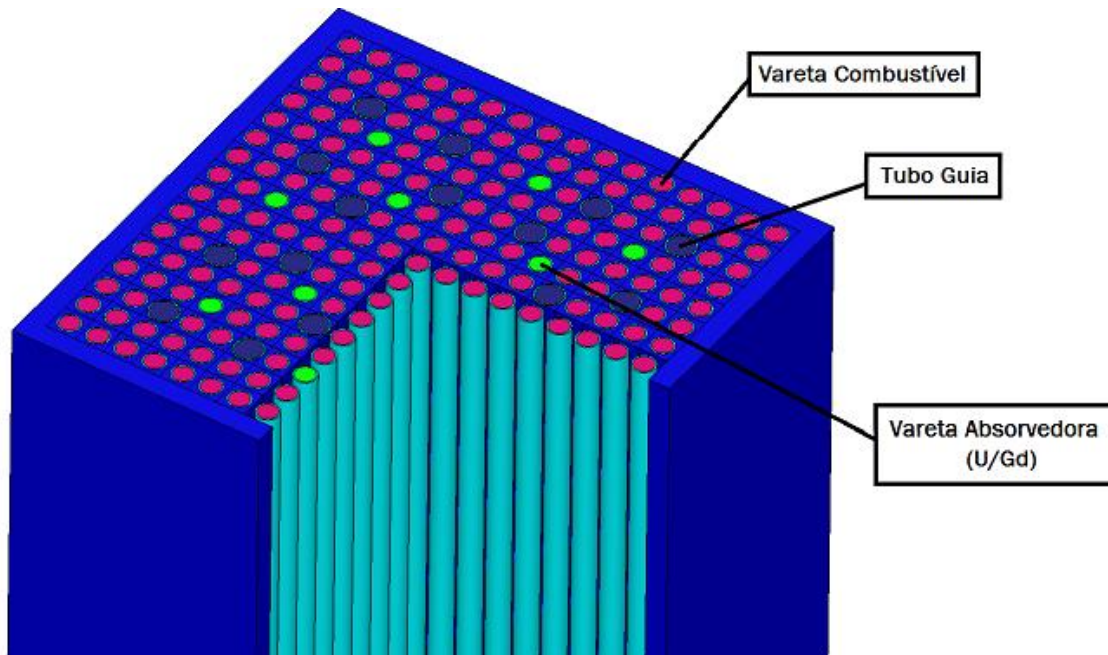


FIG. 5.4 Elemento combustível com veneno queimável - Vista 3D.

Após o processamento e modelagem dos elementos combustíveis, com e sem veneno queimável, pelo módulo KENO-VI e posterior obtenção das seções de choque macroscópicas pelo módulo T-NEWT, os dados nucleares foram gravados em arquivo para o uso no cálculo dos coeficientes da expansão polinomial. Os capítulos 6 e 7, que seguem, apresentam as equações parametrizadas das seções de choque analisadas em função dos parâmetros descritos no capítulo 3, para cada ciclo de queima, referentes aos elementos combustíveis sem e com veneno queimável, respectivamente.

6 CÁLCULO PARA O ELEMENTO COMBUSTÍVEL SEM VENENO QUEIMÁVEL

6.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, são apresentadas em tabelas as expansões polinomiais das seções de choque macroscópicas homogeneizadas e do fator de multiplicação infinito (k_{inf}) correspondente ao elemento combustível sem veneno queimável em função da temperatura do combustível, temperatura e respectiva densidade do moderador, concentração de boro solúvel ($^{10}_5B$) e o enriquecimento de $^{235}_{92}U$. Os valores dos parâmetros de análise estão dispostos na TAB. 3.1 do capítulo 3. Também são apresentados gráficos para representar o comportamento das seções de choque de fissão, espalhamento e captura, tanto para o espectro rápido como o para térmico, e k_{inf} , descritos em função dos parâmetros analisados de forma individualizada para cada expansão polinomial, por meio das FIG. 6.1 a 6.112, apresentadas em cada item. Lembrando que a soma das seções de choque de fissão com a captura, resulta na seção de choque de absorção, e se somada com a seção de choque de espalhamento, resulta na seção de choque total. Os gráficos correspondentes às seções de choque complementares estão disponibilizados no apêndice 11.3 desta dissertação de mestrado. Por fim, é feita uma análise do comportamento dos dados parametrizados ao longo dos quatro ciclos apresentados.

Este capítulo foi dividido em subcapítulos designados pelos ciclos de queima, onde em cada um são apresentadas as composições utilizadas no elemento combustível. As expansões polinomiais apresentadas nas tabelas destes subcapítulos foram escritas com os coeficientes contendo valores com até cinco casas decimais, ou seja, valores com coeficientes menores que 10^{-05} foram desprezados. Nas equações parametrizadas, a variável normalizada x representa o argumento, conforme descrito no capítulo 3.3.2, EQ. 3.10.

6.2 CICLO ZERO

O ciclo zero representa o elemento combustível fresco, ou seja, sem a depleção do mesmo. A composição utilizada é composta pelas três misturas apresentadas no capítulo 5, seção 2, e os parâmetros estão apresentados na TAB. 3.2, do capítulo 3.

6.2.1 PARAMETRIZAÇÃO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DO COMBUSTÍVEL

Neste item, é apresentada uma descrição do comportamento das seções de choque em função da variação da temperatura do combustível, por meio de uma representação gráfica da expansão polinomial e por meio de uma interpretação teórica dos resultados.

À medida que a temperatura do combustível se eleva, os materiais que o compõem são expandidos com o calor, fazendo com que sua densidade diminua. Isto resulta no aumento do comprimento de difusão e no tempo de vida dos nêutrons térmicos. Ocorre também um aumento da probabilidade de fuga de nêutrons durante a moderação para energias térmicas e a captura de nêutrons térmicos.

Analisando o comportamento das seções de choque macroscópicas representado pelas expansões polinomiais, descritas na tabela 6.1, pode-se observar que: Há uma diminuição da taxa de fissão e também ocorre um aumento da taxa de absorção com o aumento da temperatura do combustível. Em relação à seção de choque de fissão, observou-se uma maior resposta para o grupo térmico do que para o grupo rápido, conforme mostram as FIG. 6.1 e 6.2 e as funções descritas nas EQ. 6.1 e 6.2 abaixo.

$$\Sigma_f^r = 0,0029 \quad (6.1)$$

$$\Sigma_f^r = 0,04129 - 0,00013x - 0,00011x^2 - 0,00005x^3 + 0,00011x^4 \quad (6.2)$$

TAB. 6.1 Seções de choque em função da temperatura do combustível em um EC sem

veneno queimável para o reator fresco.

Seção de Choque	Grupo	Expansão Polinomial
Fissão	Rápido	0,0029
	Térmico	$0,04129 - 0,00013x - 0,00011x^2 - 0,00005x^3 + 0,00011x^4$
Total	Rápido	$0,53470 + 0,00043x - 0,00023x^2 - 0,00006x^3 + 0,00019x^4$
	Térmico	$1,23407 - 0,00137x + 0,00203x^2 + 0,00084x^3 - 0,00190x^4$
Espalhamento Total	Rápido	$0,52535 + 0,00017x - 0,00013x^2 - 0,00004x^3 + 0,00011x^4$
	Térmico	$1,15040 - 0,00113x + 0,00205x^2 + 0,00087x^3 - 0,00193x^4$
Absorção	Rápido	$0,00939 + 0,00027x - 0,00009x^2 - 0,00001x^3 + 0,00007x^4$
	Térmico	$0,08368 - 0,00024x - 0,00007x^2 - 0,00003x^3 + 0,00007x^4$
Captura	Rápido	$0,00711 + 0,00027x - 0,00008x^2 - 0,00001x^3 + 0,00007x^4$
	Térmico	$0,04239 - 0,00011x + 0,00004x^2 + 0,00001x^3 - 0,00003x^4$
Nu-Fissão	Rápido	$0,00589 - 0,00001x^2$
	Térmico	$0,10061 - 0,00030x - 0,00027x^2 - 0,00012x^3 + 0,00026x^4$
Transporte	Rápido	$0,21786 - 0,00022x + 0,00037x^2 + 0,00015x^3 - 0,00035x^4$
	Térmico	$0,74530 - 0,00080x + 0,00100x^2 + 0,00042x^3 - 0,00095x^4$
Espalhamento 1-1	–	$0,50635 + 0,00037x - 0,00018x^2 - 0,00005x^3 + 0,00015x^4$
Espalhamento 1-2	–	$0,01900 - 0,00020x + 0,00005x^2 - 0,00004x^4$
Espalhamento 2-2	–	$1,15040 - 0,00113x + 0,00205x^2 + 0,00087x^3 - 0,00193x^4$

A parametrização do fator de multiplicação infinito é dada pela função abaixo:

$$k_{\infty} = 1,01353 - 0,01114x + 0,00169x^2 - 0,00017x^3 - 0,00120x^4 \quad (6.3)$$

Para uma visualização mais clara do comportamento das seções de choque macroscópicas homogeneizadas e do fator de multiplicação infinito em função da variação da temperatura do combustível, gráficos foram disponibilizados de forma individualizada. Os valores dos coeficientes das expansões polinomiais apresentadas foram escritos sem limites de casas decimais.

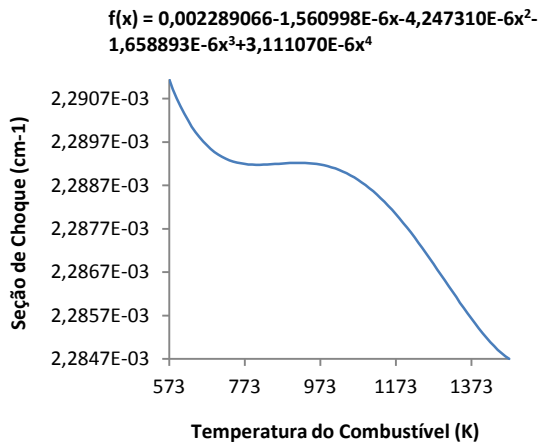


FIG. 6.1 Seção de choque de fissão do grupo rápido.

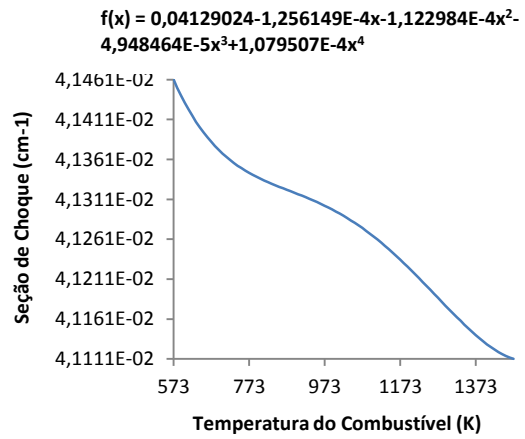


FIG. 6.2 Seção de choque de fissão do grupo térmico.

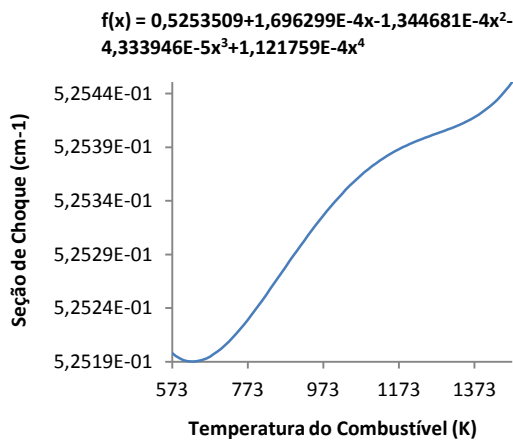


FIG. 6.3 Seção de choque de espalhamento do grupo rápido.

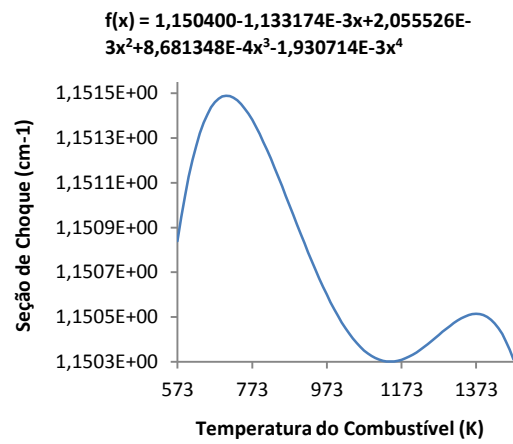


FIG. 6.4 Seção de choque de espalhamento do grupo térmico.

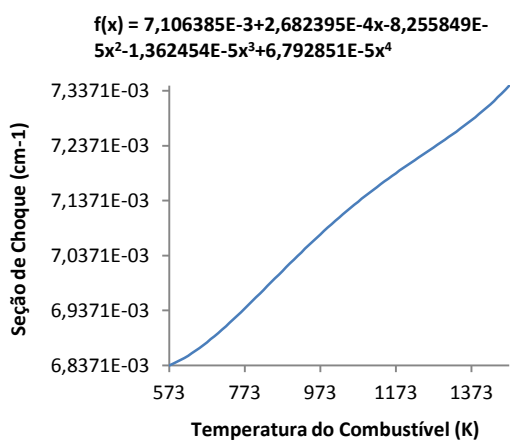


FIG. 6.5 Seção de choque de captura do grupo rápido

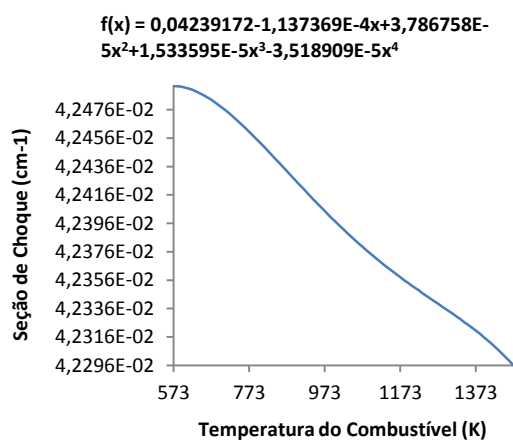


FIG. 6.6 Seção de choque de captura do grupo térmico.

Observa-se também um aumento da seção de choque espalhamento para o grupo rápido com o aumento da temperatura do combustível, devido ao aumento da energia

cinética do meio.

O aumento da temperatura do combustível leva a um aumento da largura de ressonância, provocada pelo aumento da energia cinética do núcleo de ${}^{238}_{92}\text{U}$. Apesar do aumento da largura de ressonância, a altura do pico decresce, mantendo a área embaixo da curva de ressonância constante. Se a ressonância das seções de choque de absorção é grande o suficiente, o alargamento da região resultará no decréscimo da probabilidade de escape à ressonância, fazendo com que todos os nêutrons com energias na região da ressonância sejam capturados. Este comportamento pode ser visto nas FIG. 6.4 e 6.5, com o aumento da taxa de captura na faixa rápida e diminuição na faixa térmica.

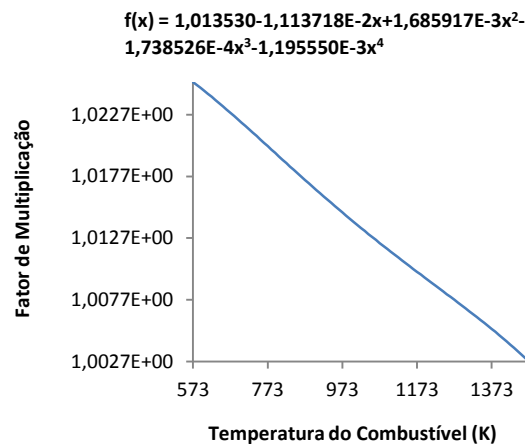


FIG. 6.7 Fator de multiplicação em função da temperatura do combustível.

A variação da temperatura no núcleo do reator afeta o fator de multiplicação de nêutrons devido a mudar a densidade resultante do meio o que altera a seção de choque macroscópica. O efeito dominante da variação da temperatura é a mudança da ressonância de absorção, causada pelo efeito Doppler.

6.2.2 PARAMETRIZAÇÃO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA E DENSIDADE DO MODERADOR

As funções parametrizadas das seções de choque, com variação na temperatura e, conseqüentemente, densidade do moderador são descritas na TAB. 6.2. O argumento x provém da normalização apresentada na EQ. 3.10. A temperatura do moderador varia de 300 a 613 K.

Pela análise do comportamento das seções de choque macroscópicas representado pelas expansões polinomiais, descritas na TAB. 6.2, pode-se observar que a seção de choque de fissão tem um comportamento similar ao descrito no item anterior, sendo para o grupo rápido, menos sensível com a variação da temperatura do moderador, do que para o grupo térmico, o qual diminui mais acentuadamente, conforme as FIG. 6.8 e 6.9 e as funções 6.4 e 6.5 descritas abaixo.

$$\Sigma_f^r = 0,00234 - 0,00004x - 0,00002x^3 - 0,00003x^4 \quad (6.4)$$

$$\Sigma_f^t = 0,04495 - 0,00455x + 0,00039x^2 - 0,00043x^3 - 0,00084x^4 \quad (6.5)$$

O aumento da temperatura do moderador conduz a uma diminuição da moderação de nêutrons e por conseqüência, uma diminuição no número de fissões e das taxas de espalhamento.

Observa-se também que o aumento da temperatura do moderador, conduz a um endurecimento do espectro, resultando também em um alargamento da ressonância de absorção, em ressonâncias “low-lying” para o isótopo do ${}^{238}_{92}\text{U}$. Tais efeitos levam a um coeficiente de reatividade mais negativo. Neste caso, aumenta-se a absorção de nêutrons pelo ${}^{238}_{92}\text{U}$, devido ao nêutron se tornar mais transparente, ou seja, como a moderação diminui um maior número de nêutrons de uma vareta de combustível atinge a outra com energias maiores.

TAB. 6.2 Seções de choque em função da temperatura e densidade do moderador em um EC sem veneno queimável para o reator fresco.

Seção de Choque	Grupo	Expansão Polinomial
Fissão	Rápido	$0,00234 - 0,00004x - 0,00002x^3 - 0,00003x^4$
	Térmico	$0,04495 - 0,00455x + 0,00039x^2 - 0,00043x^3 - 0,00084x^4$
Total	Rápido	$0,61596 - 0,07757x - 0,01125x^2 - 0,01647x^3 - 0,02780x^4$
	Térmico	$1,52946 - 0,30833x - 0,02204x^2 - 0,04981x^3 - 0,08617x^4$
Espalhamento Total	Rápido	$0,60634 - 0,07731x - 0,01122x^2 - 0,01636x^3 - 0,02765x^4$
	Térmico	$1,43133 - 0,29139x - 0,02245x^2 - 0,04805x^3 - 0,08267x^4$
Absorção	Rápido	$0,00967 - 0,00026x - 0,00002x^2 - 0,00010x^3 - 0,00016x^4$
	Térmico	$0,09813 - 0,01693x + 0,00039x^2 - 0,00178x^3 - 0,00348x^4$
Captura	Rápido	$0,00733 - 0,00022x - 0,00002x^2 - 0,00008x^3 - 0,00013x^4$
	Térmico	$0,05318 - 0,01238x - 0,00134x^3 - 0,00264x^4$
Nu-Fissão	Rápido	$0,00603 - 0,00012x - 0,00001x^2 - 0,00005x^3 - 0,00008x^4$
	Térmico	$0,10954 - 0,01109x + 0,00095x^2 - 0,00106x^3 - 0,00206x^4$
Transporte	Rápido	$0,23735 - 0,01857x - 0,00273x^2 - 0,00392x^3 - 0,00660x^4$
	Térmico	$0,90161 - 0,15748x - 0,01754x^2 - 0,02694x^3 - 0,04746x^4$
Espalhamento 1-1	–	$0,58239 - 0,07260x - 0,01052x^2 - 0,01539x^3 - 0,02599x^4$
Espalhamento 1-2	–	$0,02395 - 0,00471x - 0,00069x^2 - 0,00097x^3 - 0,00165x^4$
Espalhamento 2-2	–	$1,43133 - 0,29139x - 0,02245x^2 - 0,04805x^3 - 0,08267x^4$

O principal efeito da elevação da temperatura e conseqüentemente diminuição da densidade do moderador é a perda de moderação, a qual causa um correspondente aumento na ressonância de absorção.

A função parametrizada do fator de multiplicação infinito, em função da temperatura do moderador, é dada pela função abaixo:

$$k_{\infty} = 0,97582 + 0,04116x + 0,00755x^2 + 0,00351x^3 + 0,00599x^4 \quad (6.6)$$

Os gráficos referentes ao comportamento das seções de choque selecionadas, assim como do fator de multiplicação infinito, encontram-se nas FIG. 6.8 a 6.14.

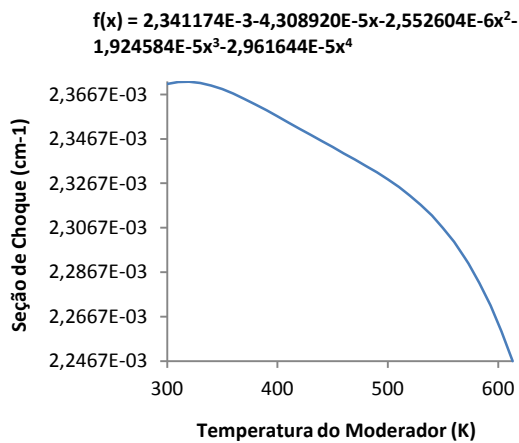


FIG. 6.8 Seção de choque de fissão do grupo rápido.

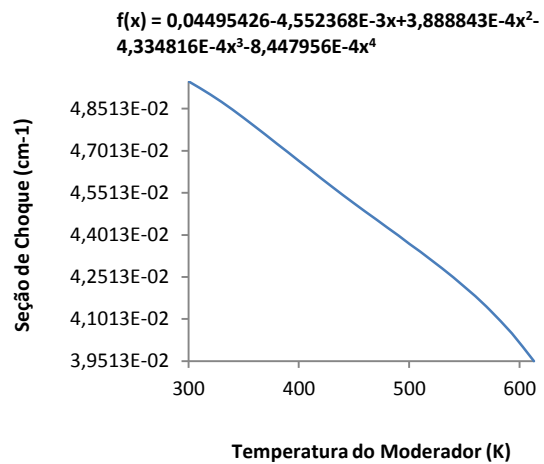


FIG. 6.9 Seção de choque de fissão do grupo térmico.

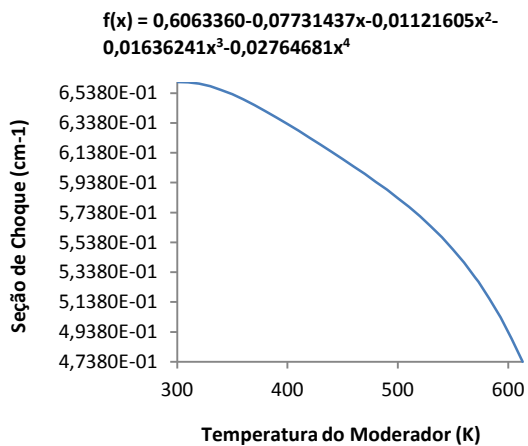


FIG. 6.10 Seção de choque de espalhamento do grupo rápido.

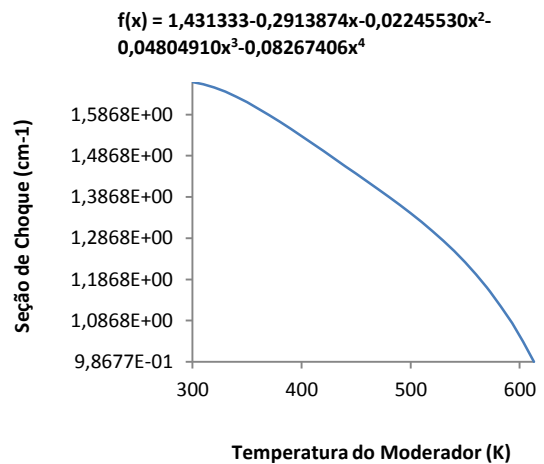


FIG. 6.11 Seção de choque de espalhamento do grupo térmico.

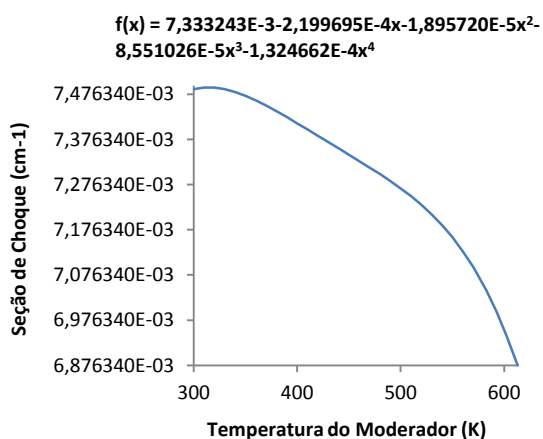


FIG. 6.12 Seção de choque de captura do grupo rápido.

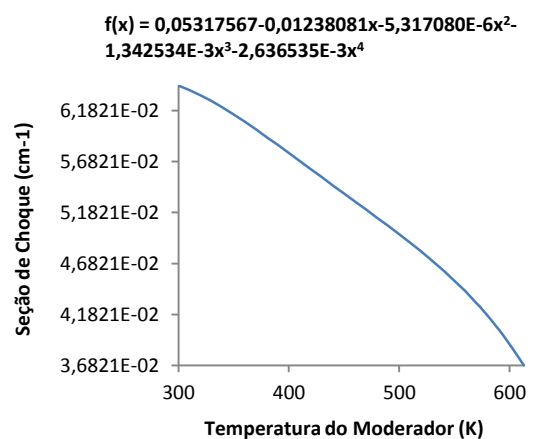


FIG. 6.13 Seção de choque de captura do grupo térmico.

O espalhamento, tanto na faixa rápida e térmica de energia, diminui devido à diminuição da densidade do moderador com o aumento da temperatura do mesmo. Já

a seção de choque de captura, para ambos os grupos, acompanhou o mesmo comportamento da seção de choque de absorção.

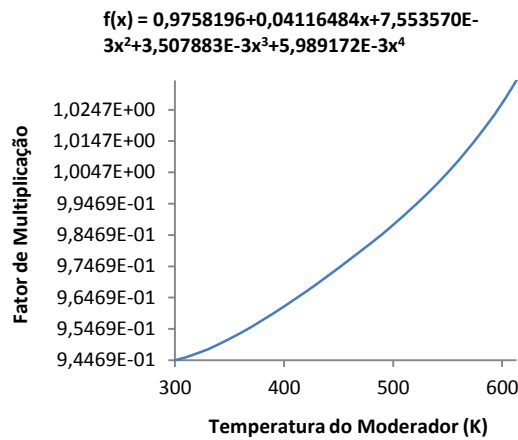


FIG. 6.14 Fator de multiplicação em função da temperatura do moderador.

O aumento da criticalidade, correspondente ao aumento do fator multiplicação ocorre devido à diminuição da densidade do moderador. Como no moderador há boro solúvel, que é um sequestrador de nêutrons, diminuindo a densidade do moderador, diminui a concentração de boro solúvel, aumentando assim a população de nêutrons.

6.2.3 PARAMETRIZAÇÃO EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE BORO SOLÚVEL

O ácido bórico, H_3BO_3 , possui uma elevada seção de choque de captura de nêutrons, exibida pelo $^{10}_5B$, isótopo presente em 20 % do boro natural. Isto causa um aumento na absorção de nêutrons e por consequência uma diminuição do número de fissões.

As expansões polinomiais das seções de choque macroscópicas, em função da concentração de boro, estão descritas na TAB. 6.3.

TAB. 6.3 Seções de choque em função da concentração de boro solúvel em um EC sem veneno queimável para o reator fresco.

Seção de Choque	Grupo	Expansão Polinomial
Fissão	Rápido	0,00229
	Térmico	$0,04053 - 0,00227x + 0,00018x^2 - 0,00001x^3$
Total	Rápido	$0,53463 - 0,00007x$
	Térmico	$1,22947 - 0,01378x + 0,00164x^2 - 0,00015x^3 + 0,00003x^4$
Espalhamento Total	Rápido	$0,52524 - 0,00027x$
	Térmico	$1,14163 - 0,02602x + 0,00217x^2 - 0,00019x^3 + 0,00002x^4$
Absorção	Rápido	$0,00943 + 0,00020x$
	Térmico	$0,08784 + 0,01223x - 0,00052x^2 + 0,00004x^3$
Captura	Rápido	$0,00714 + 0,00021x$
	Térmico	$0,04732 + 0,01450x - 0,00070x^3$
Nu-Fissão	Rápido	$0,00589 - 0,00001x$
	Térmico	$0,09875 - 0,00553x + 0,00043x^2 - 0,00003x^3$
Transporte	Rápido	$0,21788 - 0,00003x$
	Térmico	$0,74070 - 0,01339x + 0,00202x^2 - 0,00023x^3 + 0,00003x^4$
Espalhamento 1-1	–	$0,50627 - 0,00010x$
Espalhamento 1-2	–	$0,01897 - 0,00017x$
Espalhamento 2-2	–	$1,14163 - 0,02602x + 0,00217x^2 - 0,00019x^3 + 0,00002x^4$

Observa-se também que o aumento da concentração de boro causou um aumento na taxa de absorção, tanto para a faixa térmica quanto para a rápida

A EQ. 6.7 representa o comportamento do fator de multiplicação infinito, conforme:

$$k_{\infty} = 0,95958 - 0,15496x + 0,02989x^2 - 0,00597x^3 + 0,00103x^4 \quad (6.7)$$

As FIG. 6.15 a 6.21 descrevem o comportamento das seções de choque e fator de multiplicação analisados, frente à variação da concentração de boro solúvel.

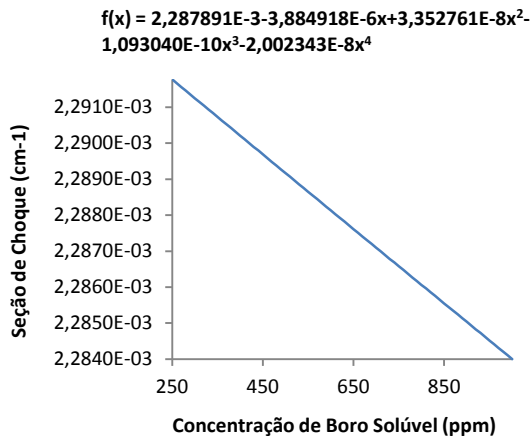


FIG. 6.15 Seção de choque de fissão do grupo rápido.

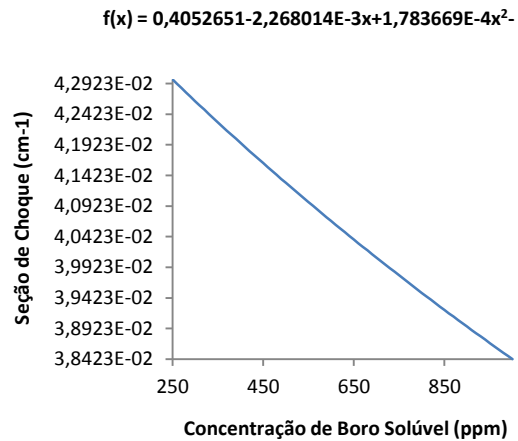


FIG. 6.16 Seção de choque de fissão do grupo térmico.

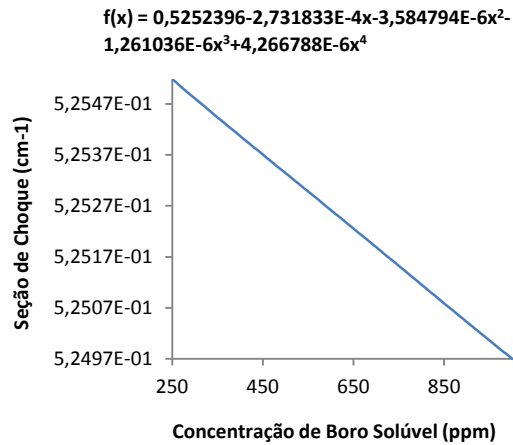


FIG. 6.17 Seção de choque de espalhamento do grupo rápido.

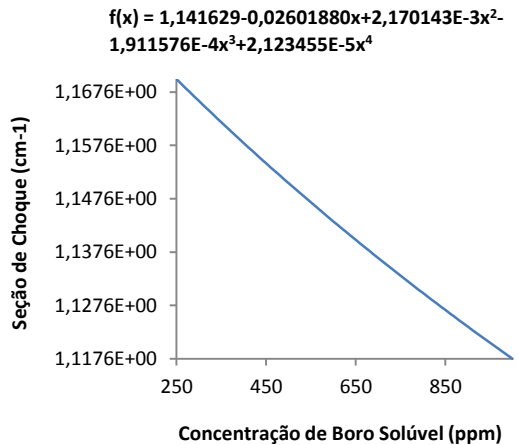


FIG. 6.18 Seção de choque de espalhamento do grupo térmico.

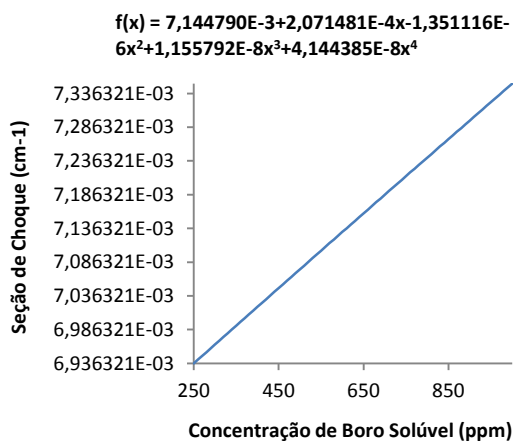


FIG. 6.19 Seção de choque de captura do grupo rápido.

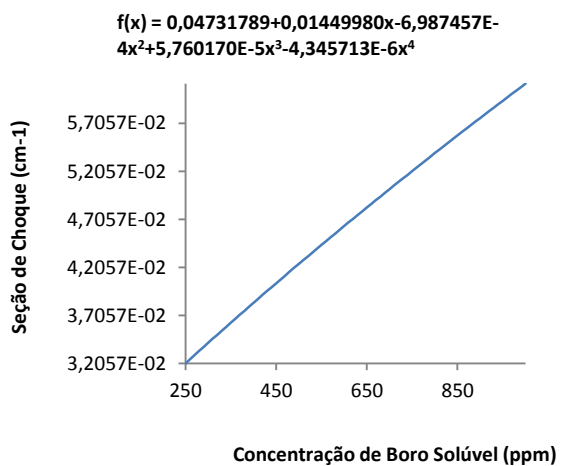


FIG. 6.20 Seção de choque de captura do grupo térmico.

Como se aumenta a absorção no meio há uma relativa diminuição do espalhamento.

Análogo à seção de choque de absorção, há um aumento na taxa de captura de nêutrons.

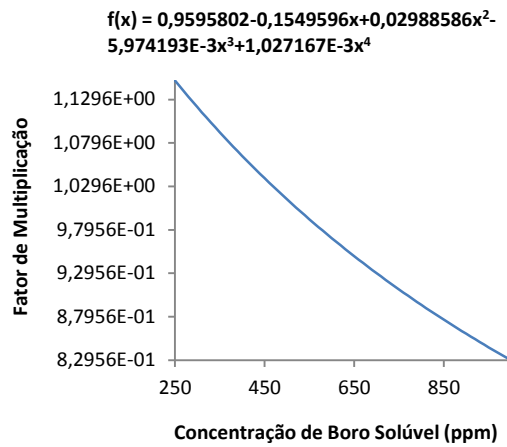


FIG. 6.21 Fator de multiplicação em função da concentração de boro solúvel.

A diminuição da população de nêutrons é explicada pelo aumento da concentração do sequestrante natural de nêutrons, o $^{10}_5B$.

6.2.4 PARAMETRIZAÇÃO EM FUNÇÃO DO ENRIQUECIMENTO DE $^{235}_{92}U$

As funções parametrizadas das seções de choque macroscópicas, em função da concentração de $^{235}_{92}U$ podem ser vista na TAB. 6.4.

As funções descritas a partir da variação do enriquecimento do urânio revelam um aumento um aumento na taxa de absorção, tanto na faixa rápida como na faixa térmica de energia, visto que há um aumento nas taxas de captura e de fissão.

TAB. 6.4 Seções de choque em função da concentração do enriquecimento de urânio em um EC sem veneno queimável para o reator fresco.

Seção de Choque	Grupo	Expansão Polinomial
Fissão	Rápido	$0,00251 + 0,00066x - 0,00002x^2$
	Térmico	$0,04628 + 0,01441x - 0,00149x^2 + 0,00022x^3 - 0,00004x^4$
Total	Rápido	$0,53435 - 0,00090x + 0,00001x^2$
	Térmico	$1,23291 - 0,00337x + 0,00184x^2 - 0,00035x^3 + 0,00007x^4$
Espalhamento Total	Rápido	$0,52475 - 0,00172x + 0,00004x^2 - 0,00001x^3$
	Térmico	$1,14402 - 0,01845x + 0,00320x^2 - 0,00055x^3 + 0,00017x^4$
Absorção	Rápido	$0,00964 + 0,00083x - 0,00003x^2$
	Térmico	$0,08890 + 0,01507x - 0,00143x^2 + 0,00021x^3 - 0,00004x^4$
Captura	Rápido	$0,00713 + 0,00017x - 0,00001x^2$
	Térmico	$0,04262 + 0,00066x - 0,00005x^2 + 0,00001x^3$
Nu-Fissão	Rápido	$0,00643 + 0,00161x - 0,00006x^2$
	Térmico	$0,11277 + 0,03512x - 0,00363x^2 + 0,00054x^3 - 0,00010x^4$
Transporte	Rápido	$0,21772 - 0,00051x$
	Térmico	$0,74072 - 0,01288x + 0,00323x^2 - 0,00066x^3 + 0,00015x^4$
Espalhamento 1-1	–	$0,50593 - 0,00110x + 0,00001x^2$
Espalhamento 1-2	–	$0,01882 - 0,00062x + 0,00003x^2$
Espalhamento 2-2	–	$1,14402 - 0,01845x + 0,00320x^2 - 0,00055x^3 + 0,00017x^4$

A parametrização do fator de multiplicação infinito, em função do enriquecimento do $^{235}_{92}\text{U}$ é dada pela função abaixo:

$$k_{\infty} = 1,06625 + 0,14010x - 0,03819x^2 + 0,01245x^3 - 0,00446x^4 \quad (6.8)$$

Os gráficos apresentados nas FIG. 6.22 a 6.27 demonstram o comportamento das seções de choque analisadas, assim como o comportamento do fator de multiplicação infinito.

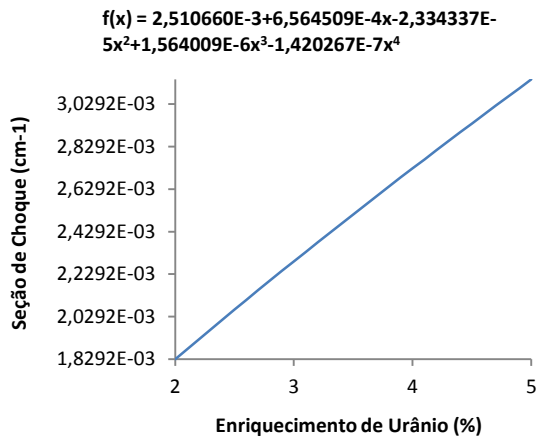


FIG. 6.22 Seção de choque de fissão do grupo rápido.

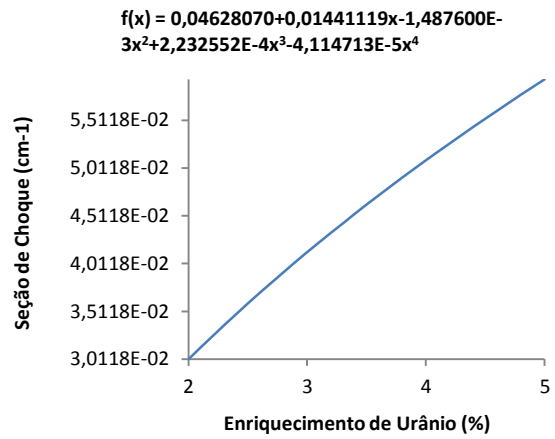


FIG. 6.23 Seção de choque de fissão do grupo térmico.

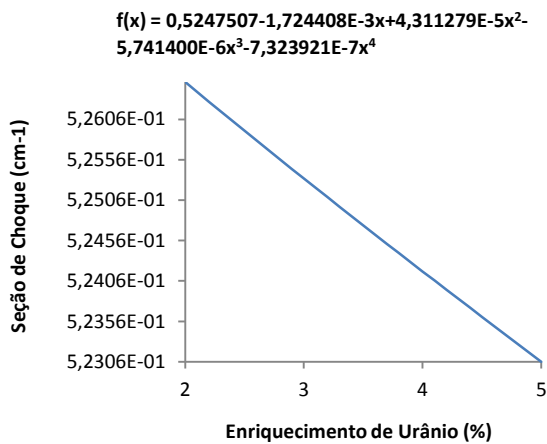


FIG. 6.24 Seção de choque de espalhamento do grupo rápido.

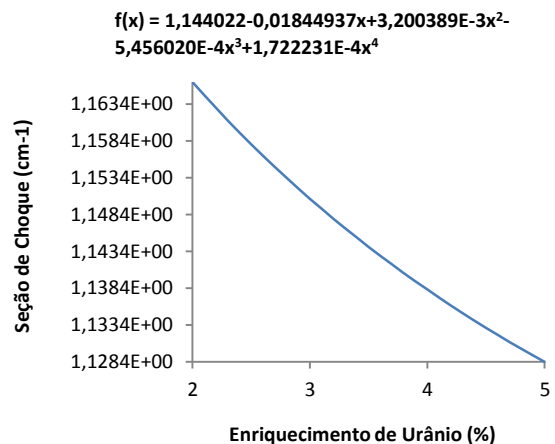


FIG. 6.25 Seção de choque de espalhamento do grupo térmico.

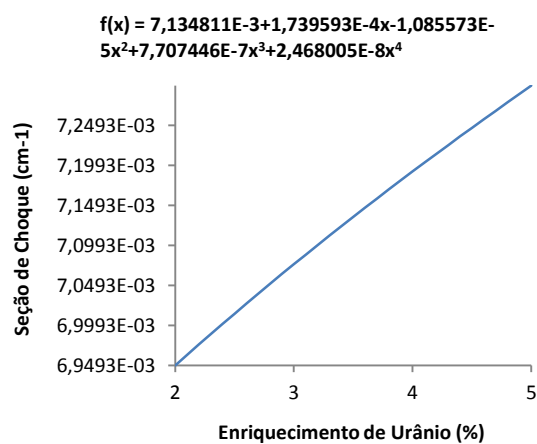


FIG. 6.26 Seção de choque de captura do grupo rápido.

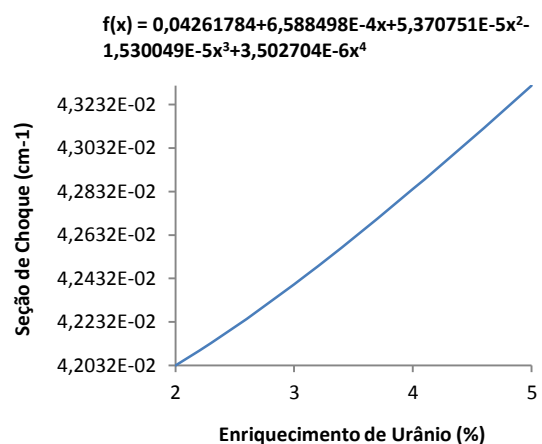


FIG. 6.27 Seção de choque de captura do grupo térmico.

O aumento do enriquecimento de urânio faz com que haja mais isótopos físeis, ou seja, mais isótopos de $^{235}_{92}\text{U}$ no combustível, aumentando assim a taxa de fissão.

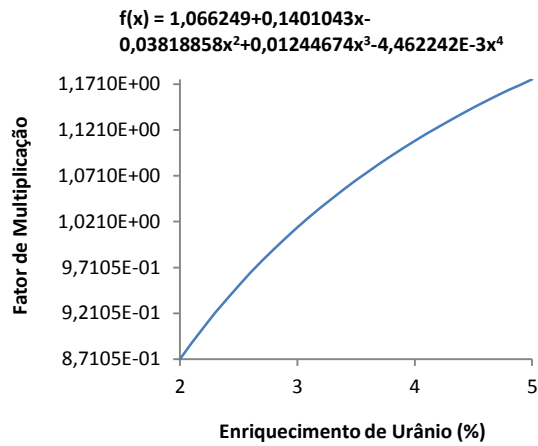


FIG. 6.28 Fator de multiplicação em função do enriquecimento de urânio.

Quanto mais fissões ocorrem dentro do reator, mais nêutrons serão gerados, aumentando a sua população.

6.3 CICLO 1

O combustível do reator fresco foi utilizado como *input* no módulo T6-DEPL que processou a depleção do combustível, gerando uma nova composição. A TAB. 6.5 apresenta os fragmentos de fissão e os actínídeos, em função do enriquecimento do $^{235}_{92}\text{U}$, em valores de *number density*.

TAB. 6.5 Composições isotópicas dos núclídeos no primeiro ciclo de queima em um EC sem veneno queimável.

Nuclídeo	Number Density (atom/b-cm) x Enriquecimento de Urânio (%)				
	2 %	2,5 %	3 %	4 %	5 %
$^{234}_{92}\text{U}$	1,4750E-08	1,7810E-08	2,0750E-08	2,6570E-08	3,2130E-08
$^{235}_{92}\text{U}$	2,5490E-04	3,4880E-04	4,4850E-04	6,5860E-04	8,7700E-04
$^{236}_{92}\text{U}$	3,7680E-05	4,2680E-05	4,6730E-05	5,2980E-05	5,7700E-05
$^{238}_{92}\text{U}$	2,2500E-02	2,2410E-02	2,2310E-02	2,2100E-02	2,1890E-02
$^{238}_{94}\text{Pu}$	3,7110E-07	3,2810E-07	2,9320E-07	2,4260E-07	2,0720E-07
$^{239}_{94}\text{Pu}$	1,0560E-04	1,0400E-04	1,0240E-04	9,9250E-05	9,6180E-05
$^{240}_{94}\text{Pu}$	2,4560E-05	2,1290E-05	1,8680E-05	1,4890E-05	1,2270E-05
$^{241}_{94}\text{Pu}$	1,2290E-05	1,0480E-05	9,0250E-06	6,8930E-06	5,4340E-06
$^{242}_{94}\text{Pu}$	1,7760E-06	1,2740E-06	9,4030E-07	5,5330E-07	3,5230E-07
$^{243}_{94}\text{Pu}$	6,4480E-10	4,3230E-10	2,9830E-10	1,5620E-10	9,0920E-11
$^{241}_{95}\text{Am}$	1,4560E-07	1,2320E-07	1,0550E-07	7,9940E-08	6,2610E-08
$^{242}_{95}\text{Am}^*$	1,6630E-09	1,3720E-09	1,1430E-09	8,1780E-10	6,0360E-10
$^{243}_{95}\text{Am}$	1,6740E-07	1,0840E-07	7,3350E-08	3,7440E-08	2,1380E-08
$^{242}_{96}\text{Cm}$	2,6370E-08	1,9350E-08	1,4610E-08	8,9590E-09	5,9110E-09
$^{243}_{96}\text{Cm}$	2,3100E-10	1,5280E-10	1,0540E-10	5,5730E-11	3,2800E-11
$^{244}_{96}\text{Cm}$	1,9890E-08	1,1480E-08	7,0540E-09	3,0880E-09	1,5650E-09
$^{245}_{96}\text{Cm}$	5,5250E-10	2,9540E-10	1,6990E-10	6,6590E-11	3,0890E-11
$^{95}_{42}\text{Mo}$	9,8200E-06	1,0050E-05	1,0210E-05	1,0440E-05	1,0580E-05
$^{99}_{43}\text{Tc}$	1,6940E-05	1,7120E-05	1,7260E-05	1,7450E-05	1,7580E-05
$^{101}_{44}\text{Ru}$	1,5480E-05	1,5450E-05	1,5430E-05	1,5410E-05	1,5400E-05
$^{103}_{45}\text{Rh}$	8,7880E-06	8,5150E-06	8,3190E-06	8,0680E-06	7,9170E-06
$^{109}_{47}\text{Ag}$	1,2800E-06	1,0810E-06	9,3310E-07	7,3120E-07	6,0250E-07
$^{133}_{55}\text{Cs}$	1,7680E-05	1,7860E-05	1,8000E-05	1,8200E-05	1,8350E-05
$^{143}_{60}\text{Nd}$	1,2590E-05	1,3130E-05	1,3550E-05	1,4160E-05	1,4570E-05
$^{145}_{60}\text{Nd}$	9,8550E-06	1,0110E-05	1,0300E-05	1,0580E-05	1,0750E-05
$^{147}_{62}\text{Sm}$	4,7300E-07	4,9140E-07	5,0620E-07	5,2790E-07	5,4310E-07
$^{149}_{62}\text{Sm}$	6,6630E-08	7,5810E-08	8,5770E-08	1,0770E-07	1,3170E-07
$^{150}_{62}\text{Sm}$	3,6130E-06	3,5560E-06	3,5080E-06	3,4270E-06	3,3590E-06
$^{151}_{62}\text{Sm}$	2,7030E-07	2,9660E-07	3,2510E-07	3,8600E-07	4,4780E-07
$^{152}_{62}\text{Sm}$	1,7670E-06	1,7220E-06	1,6800E-06	1,6080E-06	1,5440E-06
$^{153}_{63}\text{Eu}$	1,1860E-06	1,1030E-06	1,0360E-06	9,3780E-07	8,6890E-07
$^{155}_{64}\text{Gd}$	3,9930E-10	4,2410E-10	4,5540E-10	5,3440E-10	6,3200E-10
$^{16}_{8}\text{O}$	4,6450E-02	4,6450E-02	4,6460E-02	4,6460E-02	4,6470E-02

Certos produtos de fissão possuem uma seção de choque de absorção

extremamente grande. Dentre eles podemos citar o X^{135} e o Sm^{149} . Os demais produtos de fissão são considerados como um ou mais grupos, os quais são caracterizados individualmente por uma seção de choque efetiva. O X^{135} é o produto de fissão mais significativo devido a sua grande seção de choque de absorção de nêutrons térmicos (alta captura), devido a isto, o código SCALE é tratado internamente, ou seja, sem a necessidade de colocá-lo como composição no *input*. Alguns núclídeos que possuem uma meia vida muito pequena são omitidos do cálculo do burnup.

6.3.1 PARAMETRIZAÇÃO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DO COMBUSTÍVEL

Analogamente a descrição feita na análise do ciclo zero, à medida que a temperatura do combustível se eleva os materiais que o compõem são expandidos com o calor, fazendo com que sua densidade diminua. Isto resulta no aumento do comprimento de difusão e no tempo de vida dos nêutrons térmicos. Ocorre também um aumento da probabilidade de fuga de nêutrons durante a moderação para energias térmicas e a captura de nêutrons térmicos. Diferentemente da análise do ciclo zero, agora se tem a presença dos produtos de fissão na composição do combustível, possuindo núclídeos com uma elevada seção de choque de absorção, reduzindo o número de fissões e conseqüentemente a seção de choque de fissão.

A parametrização a partir da variação da temperatura do combustível, mantendo os demais valores como valores de referência se deu da temperatura de 573 a 1473 K, conforme TAB. 3.1, do capítulo 3. A TAB. 6.6 apresenta as expansões polinomiais das seções de choque analisadas, referentes à variação da temperatura do combustível.

A composição apresentada na TAB. 6.5 serviu como *input* no módulo T-NEWT para o processamento das seções de choque, em função das variáveis selecionadas.

TAB. 6.6 Seções de choque em função da temperatura do combustível em um EC sem veneno queimável no primeiro ciclo de queima.

Seção de Choque	Grupo	Expansão Polinomial
Fissão	Rápido	0,00206
	Térmico	0,04219 – 0,00002x
Total	Rápido	0,53501 + 0,00034x – 0,00001x ² + 0,00003x ³ – 0,00001x ⁴
	Térmico	1,25074 – 0,00022x – 0,00001x ² – 0,00001x ³
Espalhamento Total	Rápido	0,52567 + 0,00011x – 0,00001x ² + 0,00001x ³
	Térmico	1,15293 – 0,00036x – 0,00001x ² + 0,00002x ³ + 0,00001x ⁴
Absorção	Rápido	0,00938 – 0,00023x + 0,00002x ³ – 0,00001x ⁴
	Térmico	0,09782 + 0,00012x – 0,00002x ²
Captura	Rápido	0,00732 + 0,00023x + 0,00002x ³ – 0,00001x ⁴
	Térmico	0,05563 + 0,00014x – 0,00002x ²
Nu-Fissão	Rápido	0,00547 – 0,00001x
	Térmico	0,11018
Transporte	Rápido	0,21684 – 0,00006x – 0,00001x ² – 0,00001x ³
	Térmico	0,75626 – 0,00003x – 0,00003x ² + 0,00001x ³
Espalhamento 1-1	–	0,50674 + 0,00029x – 0,00001x ² + 0,00002x ³ – 0,00001x ⁴
Espalhamento 1-2	–	0,01893 – 0,00017x – 0,00001x ³ + 0,00001x ⁴
Espalhamento 2-2	–	1,15293 – 0,00036x – 0,00001x ² + 0,00002x ³ + 0,00001x ⁴

De acordo com as expansões apresentadas na TAB. 6.6, pode-se verificar um aumento na taxa de absorção com o aumento da temperatura. Este comportamento é esperado, pois o aumento da temperatura do combustível conduz a um aumento da captura ressonante do $^{138}_{92}\text{U}$, devido ao efeito do alargamento Doppler da ressonância. Por consequência, ocorre um decréscimo da autoblindagem.

A função resultante da expansão dos coeficientes de Tchebyshev, considerando as seções de choque em função da temperatura do combustível, é descrita na EQ. 6.9, abaixo:

$$k_{\infty} = 0,94820 - 0,01003x + 0,00019x^2 - 0,00085x^3 + 0,00035x^4 \quad (6.9)$$

Segue, abaixo, os gráficos apresentados nas FIG. 6.29 a 6,35, do comportamento das seções de choque e fator de multiplicação infinito em função da variação da temperatura do combustível.

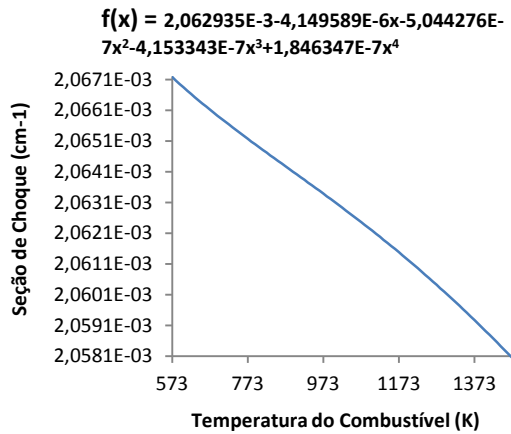


FIG. 6.29 Seção de choque de fissão do grupo rápido.

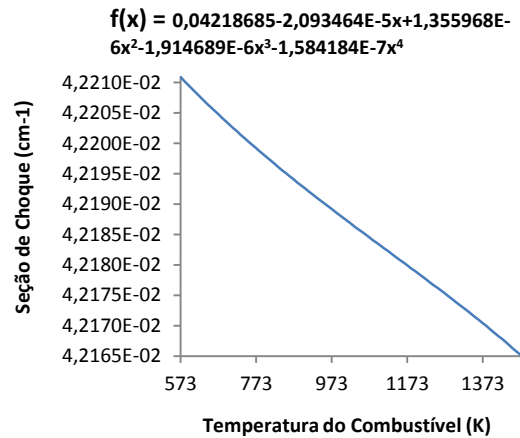


FIG. 6.30 Seção de choque de fissão do grupo térmico.

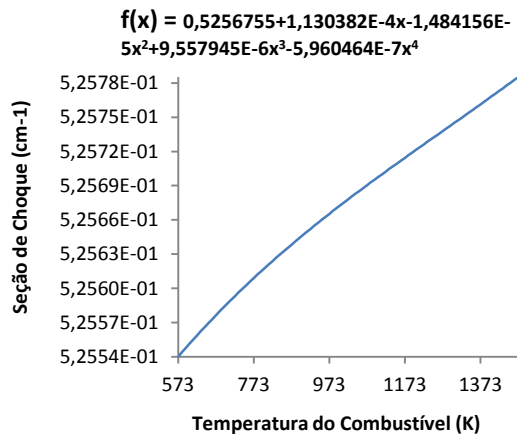


FIG. 6.31 Seção de choque de espalhamento do grupo rápido.

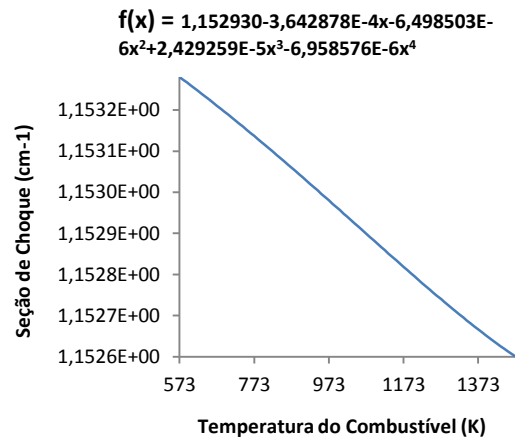


FIG. 6.32 Seção de choque de espalhamento do grupo térmico.

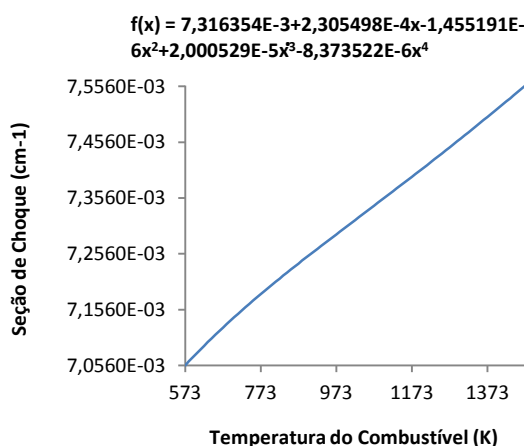


FIG. 6.33 Seção de choque de captura do grupo rápido.

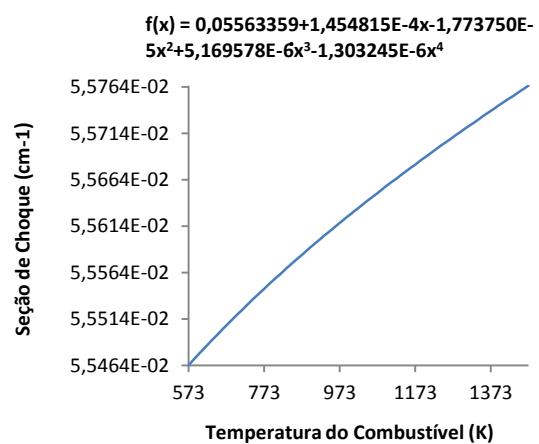


FIG. 6.34 Seção de choque de captura do grupo térmico.

A seção de choque de espalhamento rápido aumenta com a elevação da temperatura do combustível, o que é fisicamente esperado, já que a elevação da

temperatura faz com que aumente a energia cinética das partículas, e com isso, o aumento o número de colisões.

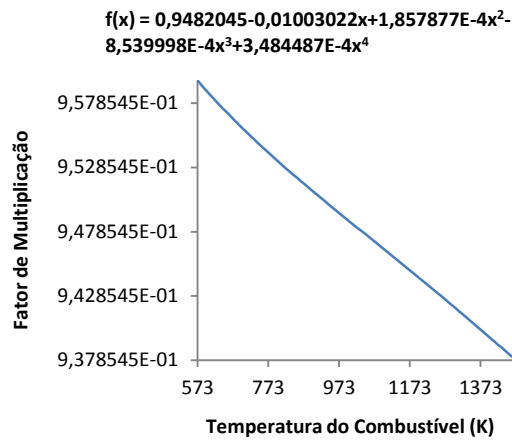


FIG. 6.35 Fator de multiplicação em da temperatura do combustível.

Como era esperado, o fator de multiplicação de nêutrons diminui devido à redução do número de fissões e do aumento da absorção no combustível.

6.3.2 PARAMETRIZAÇÃO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA E DENSIDADE DO MODERADOR

A parametrização a partir da variação da temperatura do moderador e suas respectivas densidades estão apresentadas na TAB. 6.7. A variação da temperatura do moderador se deu da temperatura de 300 a 613 K, mantendo as demais variáveis com valores de referência, apresentados na tabela 3.2 do capítulo 3.

TAB. 6.7 Seções de choque em função da temperatura e densidade do moderador em um EC sem veneno queimável no primeiro ciclo de queima.

Seção de Choque	Grupo	Expansão Polinomial
Fissão	Rápido	$0,00211 - 0,00004x - 0,00002x^3 - 0,00003x^4$
	Térmico	$0,04449 - 0,00281x + 0,00058x^2 - 0,00061x^3 - 0,00093x^4$
Total	Rápido	$0,61410 - 0,07740x - 0,01122x^2 - 0,01643x^3 - 0,02774x^4$
	Térmico	$1,54054 - 0,30940x - 0,02180x^2 - 0,05034x^3 - 0,08665x^4$
Espalhamento Total	Rápido	$0,60449 - 0,07714x - 0,01119x^2 - 0,01632x^3 - 0,02759x^4$
	Térmico	$1,43031 - 0,29470x - 0,02261x^2 - 0,04832x^3 - 0,08309x^4$
Absorção	Rápido	$0,00966 - 0,00026x - 0,00002x^2 - 0,00011x^3 - 0,00016x^4$
	Térmico	$0,11022 - 0,01472x + 0,00083x^2 - 0,00200x^3 - 0,00357x^4$
Captura	Rápido	$0,00754 - 0,00022x - 0,00002x^2 - 0,00009x^3 - 0,00013x^4$
	Térmico	$0,06573 - 0,01191x - 0,00025x^2 - 0,00139x^3 - 0,00264x^4$
Nu-Fissão	Rápido	$0,00561 - 0,00012x - 0,00001x^2 - 0,00005x^3 - 0,00008x^4$
	Térmico	$0,11569 - 0,00667x + 0,00157x^2 - 0,00161x^3 - 0,00241x^4$
Transporte	Rápido	$0,23569 - 0,01844x - 0,00271x^2 - 0,00389x^3 - 0,00655x^4$
	Térmico	$0,91160 - 0,16105x - 0,01717x^2 - 0,02718x^3 - 0,04795x^4$
Espalhamento 1-1	–	$0,58077 - 0,07246x - 0,01050x^2 - 0,01536x^3 - 0,02595x^4$
Espalhamento 1-2	–	$0,02372 - 0,00468x - 0,00069x^2 - 0,00097x^3 - 0,00164x^4$
Espalhamento 2-2	–	$1,43031 - 0,29470x - 0,02261x^2 - 0,04832x^3 - 0,08309x^4$

A partir da TAB. 6.7 pode-se observar que os valores da seção de choque de absorção, oriundos de sua respectiva expansão polinomial, são iguais à soma dos valores das seções de choque de fissão e de captura, obtidas pelos mesmos processos. De forma análoga, se constata que os valores de seções de choque total, oriundos da expansão polinomial é a soma dos valores das seções de choque de espalhamento e absorção.

A expansão polinomial do fator de multiplicação infinito, em função da densidade e temperatura do moderador é dada pela função abaixo:

$$k_{\infty} = 0,91520 + 0,04184x + 0,00772x^2 - 0,00245x^3 - 0,00100x^4 \quad (6.10)$$

Da FIG. 6.36 a 6.42 são mostrados o comportamento das seções de choque e fator de multiplicação infinito, frente à variação da temperatura e, conseqüentemente, densidade do moderador.

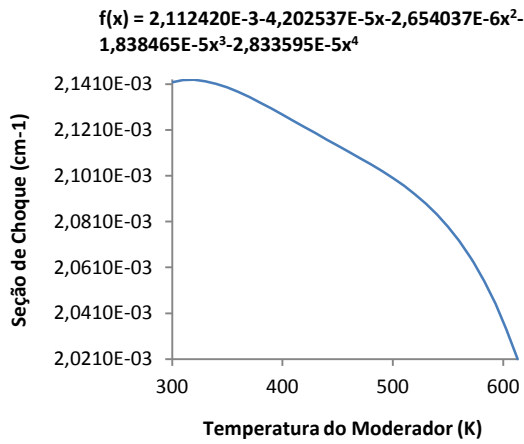


FIG. 6.36 Seção de choque de fissão do grupo rápido.

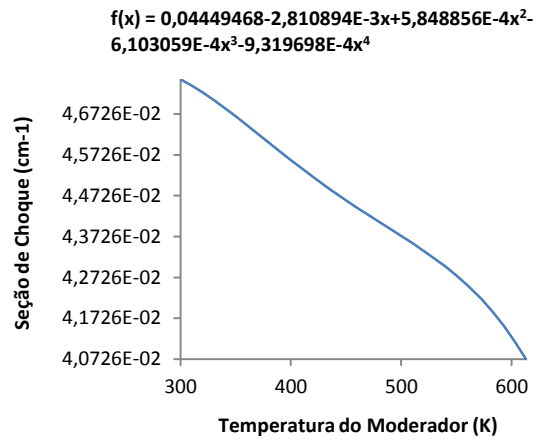


FIG. 6.37 Seção de choque de fissão do grupo térmico.

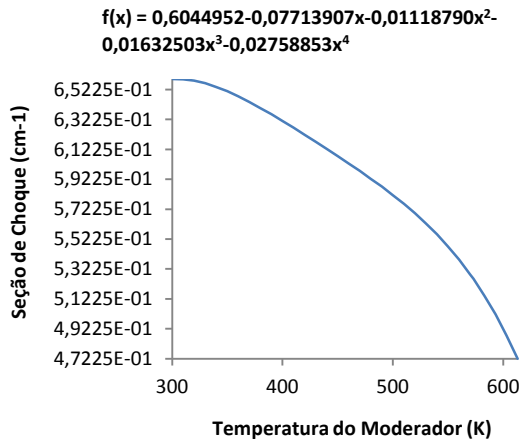


FIG. 6.38 Seção de choque de espalhamento do grupo rápido.

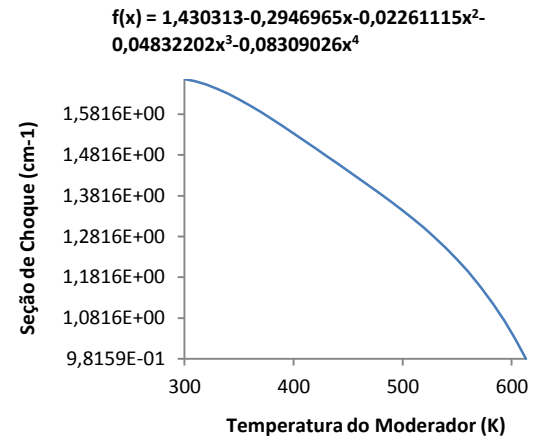


FIG. 6.39 Seção de choque de espalhamento do grupo térmico.

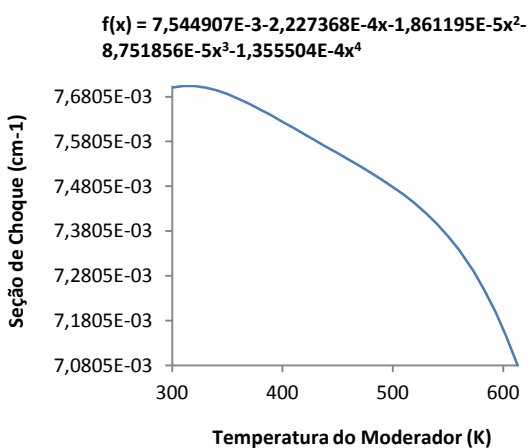


FIG. 6.40 Seção de choque de captura do grupo rápido.

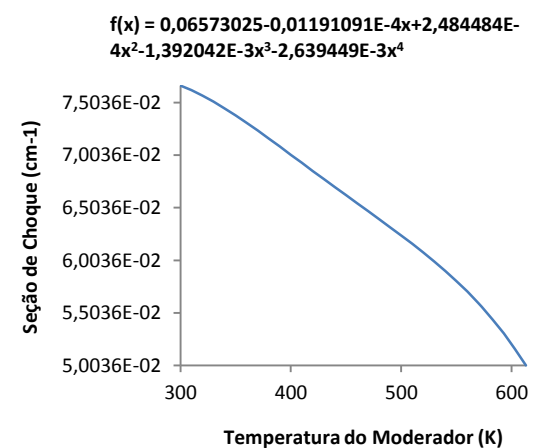


FIG. 6.41 Seção de choque de captura do grupo térmico.

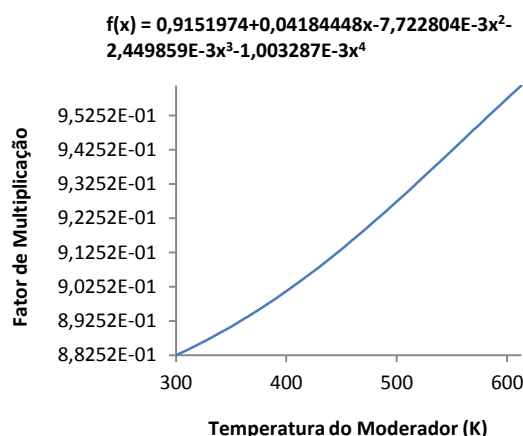


FIG. 6.42 Fator de multiplicação em função da temperatura do moderador.

6.3.3 PARAMETRIZAÇÃO EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE BORO SOLÚVEL

As expansões polinomiais apresentadas na TAB. 6.8 descritas em função da concentração de boro revelaram um aumento da absorção e por consequência, uma diminuição do número de fissões, com o aumento da concentração de boro.

TAB. 6.8 Seções de choque em função da concentração de boro solúvel em um EC sem veneno queimável no primeiro ciclo de queima.

Seção de Choque	Grupo	Expansão Polinomial
Fissão	Rápido	0,00206
	Térmico	$0,04156 - 0,00185x + 0,00013x^2 - 0,00001x^3$
Total	Rápido	$0,53494 - 0,00007x$
	Térmico	$1,24639 - 0,01260x + 0,00152x^2 - 0,00015x^3 + 0,00008x^4$
Espalhamento Total	Rápido	$0,52557 - 0,00028x$
	Térmico	$1,14420 - 0,02556x + 0,00219x^2 - 0,00017x^3$
Absorção	Rápido	$0,00942 + 0,00020x$
	Térmico	$0,10218 + 0,01293x - 0,00059x^2 + 0,00005x^3$
Captura	Rápido	$0,00736 + 0,00020x$
	Térmico	$0,06063 + 0,01478x - 0,00072x^2 + 0,00006x^3$
Nu-Fissão	Rápido	$0,00547 - 0,00001x$
	Térmico	$0,10858 - 0,00470x + 0,00033x^2 - 0,00003x^3$
Transporte	Rápido	$0,21684 - 0,00003x$
	Térmico	$0,75179 - 0,01276x + 0,00194x^2 - 0,00022x^3 + 0,00003x^4$
Espalhamento 1-1	–	$0,50667 - 0,00011x$
Espalhamento 1-2	–	$0,01890 - 0,00017x$
Espalhamento 2-2	–	$1,14420 - 0,02556x + 0,00219x^2 - 0,00017x^3$

A EQ. 6.11 descreve o comportamento do fator de multiplicação infinito obtido através da variação da concentração de boro solúvel, conforme:

$$k_{\infty} = 0,90384 - 0,12830x + 0,02290x^2 - 0,00432x^3 + 0,00071x^4 \quad (6.11)$$

As FIG. 6.43 a 6.49 descrevem o comportamento das seções de choque e fator de multiplicação analisados, frente à variação da concentração de boro solúvel.

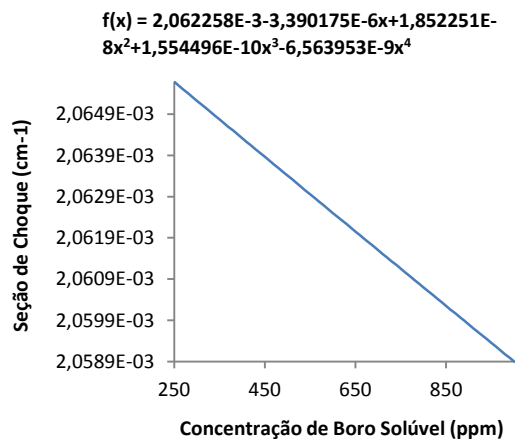


FIG. 6.43 Seção de choque de fissão do grupo rápido.

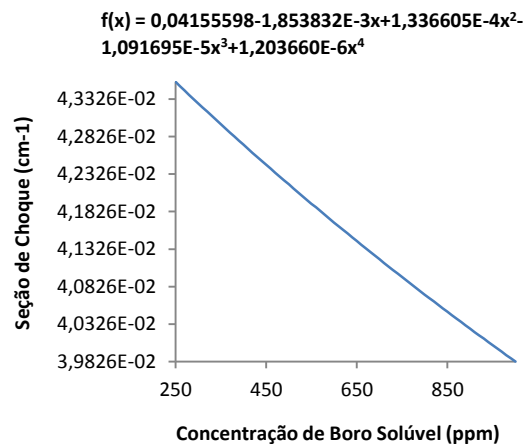


FIG. 6.44 Seção de choque de fissão do grupo térmico.

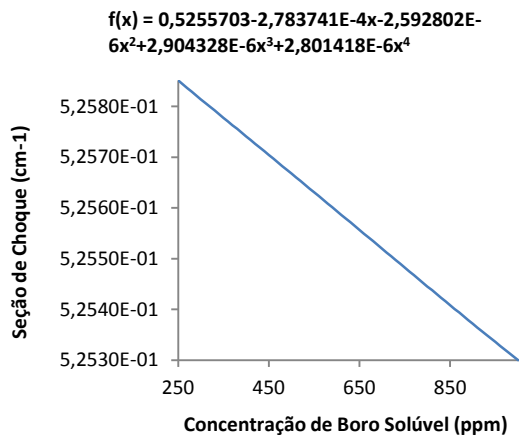


FIG. 6.45 Seção de choque de espalhamento do grupo rápido.

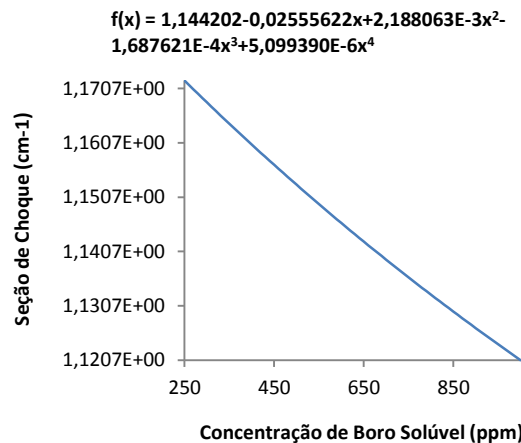


FIG. 6.46 Seção de choque de espalhamento do grupo térmico.

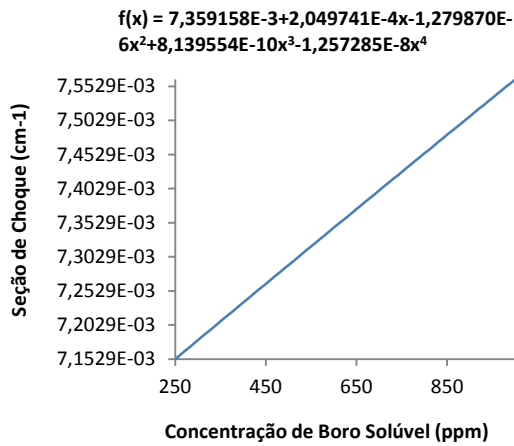


FIG. 6.47 Seção de choque de captura do grupo rápido.

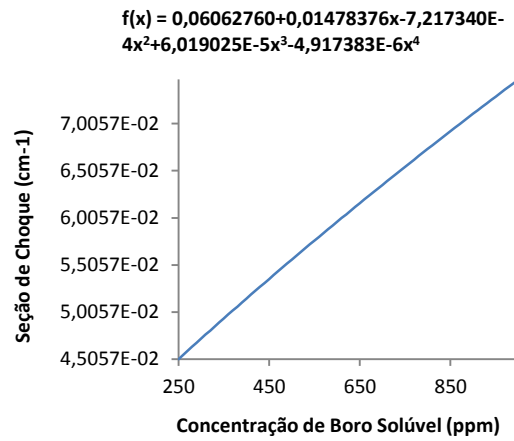


FIG. 6.48 Seção de choque de captura do grupo térmico.

Análogo à seção de choque de absorção, há um aumento na taxa de captura de nêutrons.

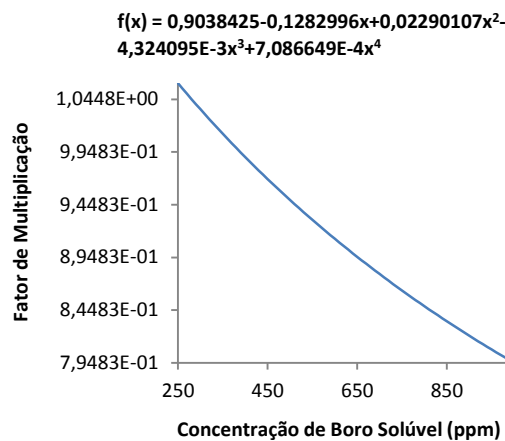


FIG. 6.49 Fator de multiplicação em função da concentração de boro solúvel.

O ácido bórico (H_3BO_3) possui uma elevada seção de choque para captura de nêutrons, exibida pelo $^{10}_5B$ (isótopo que constitui 20% do boro natural), e isto causa um aumento na absorção de nêutrons, alterando o fator de multiplicação k .

6.3.4 PARAMETRIZAÇÃO EM FUNÇÃO DO ENRIQUECIMENTO DE $^{235}_{92}U$

As expansões polinomiais das seções de choque macroscópicas, em função da

concentração de $^{235}_{92}\text{U}$, estão representadas na TAB. 6.9.

TAB. 6.9 Seções de choque em função da concentração do enriquecimento de urânio em um EC sem veneno queimável no primeiro ciclo de queima.

Seção de Choque	Grupo	Expansão Polinomial
Fissão	Rápido	$0,00225 + 0,00058x - 0,00001x^2 - 0,00001x^3$
	Térmico	$0,04629 + 0,01214x - 0,00059x^2 - 0,00019x^3 + 0,00013x^4$
Total	Rápido	$0,53486 - 0,00040x - 0,00018x^2 + 0,00009x^3 + 0,00001x^4$
	Térmico	$1,24926 - 0,00408x + 0,00138x^2 - 0,00002x^3 - 0,00007x^4$
Espalhamento Total	Rápido	$0,52530 - 0,00115x - 0,00019x^2 + 0,00010x^3 + 0,00002x^4$
	Térmico	$1,14758 - 0,01566x + 0,00167x^2 + 0,00025x^3 - 0,00016x^4$
Absorção	Rápido	$0,00960 + 0,00074x - 0,00001x^3$
	Térmico	$0,10168 + 0,01156x - 0,00033x^2 - 0,00025x^3 + 0,00013x^4$
Captura	Rápido	$0,00735 + 0,00016x$
	Térmico	$0,05539 - 0,00058x + 0,00026x^2 - 0,00006x^3$
Nu-Fissão	Rápido	$0,00594 + 0,00140x + 0,00003x^2 - 0,00003x^3 + 0,00001x^4$
	Térmico	$0,11987 + 0,02868x - 0,00131x^2 - 0,00048x^3 + 0,00031x^4$
Transporte	Rápido	$0,21682 - 0,00012x - 0,00014x^2 + 0,00007x^3 + 0,00001x^4$
	Térmico	$0,75177 - 0,01279x + 0,00211x^2 + 0,00007x^3 - 0,00014x^4$
Espalhamento 1-1	–	$0,50653 - 0,00062x - 0,00019x^2 + 0,00009x^3 + 0,00002x^4$
Espalhamento 1-2	–	$0,01878 - 0,00053x - 0,00001x^2 + 0,00001x^3$
Espalhamento 2-2	–	$1,14758 - 0,01566x + 0,00167x^2 + 0,00025x^3 - 0,00016x^4$

As funções descritas a partir da variação do enriquecimento do urânio revelam um aumento um aumento na taxa de absorção, tanto na faixa rápida como na faixa térmica de energia, visto que há um aumento nas taxas de captura e de fissão.

A parametrização do fator de multiplicação infinito, em função do enriquecimento do $^{235}_{92}\text{U}$ é dada pela função abaixo:

$$k_{\infty} = 0,99089 + 0,11790x - 0,02034x^2 + 0,00078x^3 + 0,00169x^4 \quad (6.12)$$

Os gráficos apresentados nas FIG. 6.50 a 6.56 demonstram o comportamento das seções de choque analisadas, assim como o comportamento do fator de multiplicação infinito.

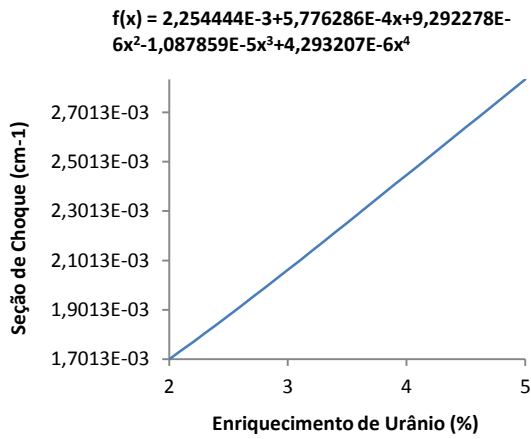


FIG. 6.50 Seção de choque de fissão do grupo rápido.

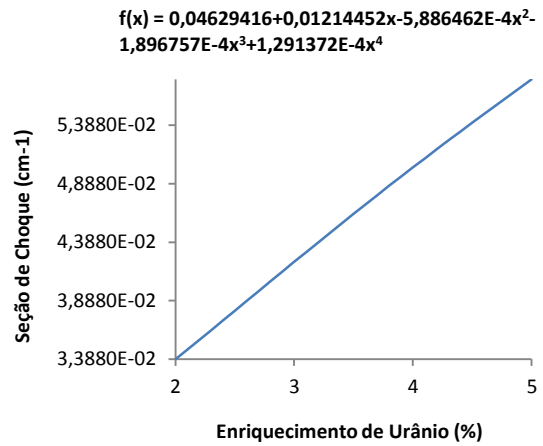


FIG. 6.51 Seção de choque de fissão do grupo térmico.

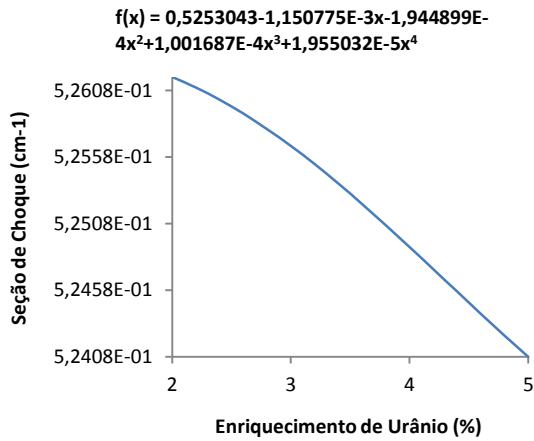


FIG. 6.52 Seção de choque de espalhamento do grupo rápido.

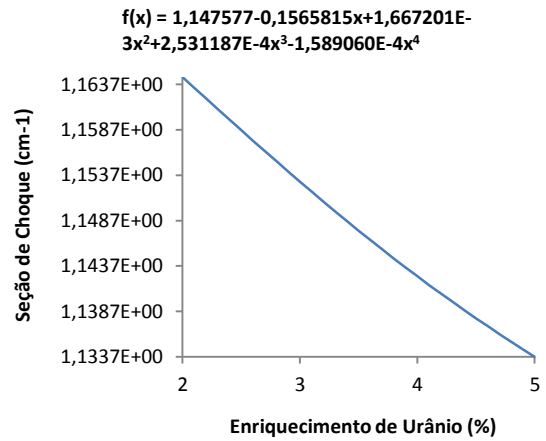


FIG. 6.53 Seção de choque de espalhamento do grupo térmico.

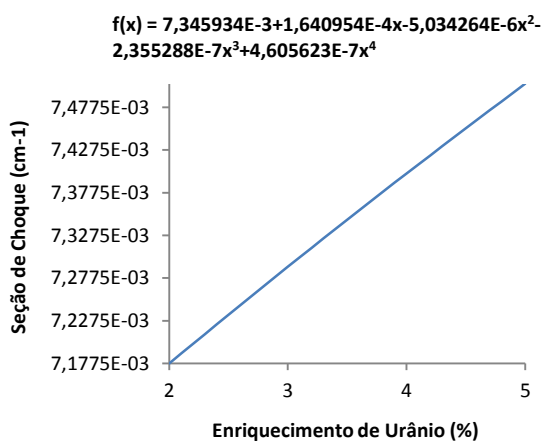


FIG. 6.54 Seção de choque de captura do grupo rápido.

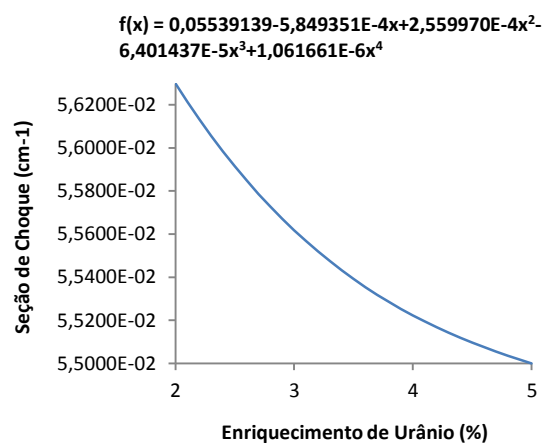


FIG. 6.55 Seção de choque de captura do grupo térmico.

O aumento da concentração do urânio enriquecido faz com que ocorram mais fissões na faixa térmica de energia, consequentemente a seção de choque de captura

térmica diminui, visto que a captura de nêutrons pelo $^{238}_{92}\text{U}$ se dá na faixa rápida de energia.

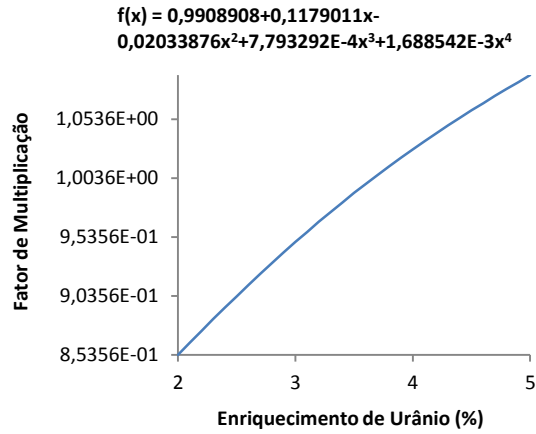


FIG. 6.56 Fator de multiplicação em função do enriquecimento de urânio.

Quanto mais fissões ocorrem dentro do reator, mais nêutrons serão gerados, aumentando a sua população.

6.4 CICLO 2

A TAB. 6.10 apresenta os valores, em *number density*, da composição utilizada no segundo ciclo de queima. Essa nova composição provém da depleção da composição utilizada no combustível referente ao primeiro ciclo de queima. Nela consta os mesmos produtos de fissão e actínídeos, porém há uma variação da concentração dos mesmos.

TAB. 6.10 Composições isotópicas dos nuclídeos no segundo ciclo de queima em um EC sem veneno queimável.

Nuclídeo	Number Density (atom/b-cm) x Enriquecimento de Urânio (%)				
	2 %	2,5 %	3 %	4 %	5 %
$^{234}_{92}\text{U}$	2,4220E-08	2,9490E-08	3,4780E-08	4,5470E-08	5,5960E-08
$^{235}_{92}\text{U}$	1,4280E-04	2,0870E-04	2,8410E-04	4,5590E-04	6,4620E-04
$^{236}_{92}\text{U}$	5,4630E-05	6,4920E-05	7,3830E-05	8,8290E-05	9,9580E-05
$^{238}_{92}\text{U}$	2,2240E-02	2,2170E-02	2,2080E-02	2,1900E-02	2,1710E-02
$^{238}_{94}\text{Pu}$	1,0960E-06	1,0280E-06	9,5530E-07	8,2510E-07	7,2030E-07
$^{239}_{94}\text{Pu}$	1,3140E-04	1,3340E-04	1,3520E-04	1,3810E-04	1,3960E-04
$^{240}_{94}\text{Pu}$	4,8170E-05	4,4350E-05	4,0840E-05	3,4870E-05	3,0150E-05
$^{241}_{94}\text{Pu}$	2,8710E-05	2,6740E-05	2,4860E-05	2,1490E-05	1,8620E-05
$^{242}_{94}\text{Pu}$	8,7580E-06	7,0210E-06	5,6680E-06	3,8130E-06	2,6700E-06
$^{243}_{94}\text{Pu}$	3,1040E-09	2,3750E-09	1,8340E-09	1,1230E-09	7,2070E-10
$^{241}_{95}\text{Am}$	6,1940E-07	5,8390E-07	5,4880E-07	4,8270E-07	4,2290E-07
$^{242}_{95}\text{Am}^*$	8,6040E-09	8,1280E-09	7,6510E-09	6,7140E-09	5,8190E-09
$^{243}_{95}\text{Am}$	1,6560E-06	1,2300E-06	9,2430E-07	5,4900E-07	3,4700E-07
$^{242}_{96}\text{Cm}$	2,0010E-07	1,6690E-07	1,3970E-07	9,9750E-08	7,3300E-08
$^{243}_{96}\text{Cm}$	3,5770E-09	2,7500E-09	2,1330E-09	1,3340E-09	8,7950E-10
$^{244}_{96}\text{Cm}$	4,3600E-07	2,9110E-07	1,9920E-07	1,0100E-07	5,6200E-08
$^{245}_{96}\text{Cm}$	2,2770E-08	1,4390E-08	9,3750E-09	4,3480E-09	2,2470E-09
$^{95}_{42}\text{Mo}$	1,7900E-05	1,8460E-05	1,8910E-05	1,9570E-05	2,0020E-05
$^{99}_{43}\text{Tc}$	3,1700E-05	3,2170E-05	3,2560E-05	3,3140E-05	3,3570E-05
$^{101}_{44}\text{Ru}$	3,0560E-05	3,0510E-05	3,0470E-05	3,0420E-05	3,0390E-05
$^{103}_{45}\text{Rh}$	1,6680E-05	1,6290E-05	1,5970E-05	1,5530E-05	1,5230E-05
$^{109}_{47}\text{Ag}$	3,1690E-06	2,8060E-06	2,5020E-06	2,0350E-06	1,7050E-06
$^{133}_{55}\text{Cs}$	3,2830E-05	3,3300E-05	3,3700E-05	3,4320E-05	3,4790E-05
$^{143}_{60}\text{Nd}$	2,0920E-05	2,2170E-05	2,3240E-05	2,4960E-05	2,6220E-05
$^{145}_{60}\text{Nd}$	1,7760E-05	1,8340E-05	1,8820E-05	1,9560E-05	2,0080E-05
$^{147}_{62}\text{Sm}$	7,9730E-07	8,3510E-07	8,6800E-07	9,2090E-07	9,6090E-07
$^{149}_{62}\text{Sm}$	6,7780E-08	7,4830E-08	8,3050E-08	1,0200E-07	1,2350E-07
$^{150}_{62}\text{Sm}$	6,9370E-06	6,8760E-06	6,8220E-06	6,7270E-06	6,6460E-06
$^{151}_{62}\text{Sm}$	3,5020E-07	3,7350E-07	4,0060E-07	4,6300E-07	5,3200E-07
$^{152}_{62}\text{Sm}$	2,9990E-06	2,9780E-06	2,9540E-06	2,9160E-06	2,8810E-06
$^{153}_{63}\text{Eu}$	3,0510E-06	2,9000E-06	2,7660E-06	2,5420E-06	2,3660E-06
$^{155}_{64}\text{Gd}$	1,1430E-09	1,1720E-09	1,2120E-09	1,3090E-09	1,4210E-09
$^{16}_{8}\text{O}$	4,6450E-02	4,6450E-02	4,6460E-02	4,6460E-02	4,6470E-02

6.4.1 PARAMETRIZAÇÃO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DO COMBUSTÍVEL

De forma análoga ao primeiro ciclo de queima, o aumento da temperatura do combustível faz com que a energia cinética das moléculas aumente, diminuindo assim a densidade do combustível.

A partir da composição apresentada na TAB. 6.10, foi realizado o processamento das seções de choque, no módulo T-NEWT, em função das variáveis selecionadas.

A TAB. 6.11 descreve as expansões polinomiais em função da variação da temperatura do combustível.

TAB. 6.11 Seções de choque em função da temperatura do combustível em um EC sem veneno queimável no segundo ciclo de queima.

Seção de Choque	Grupo	Expansão Polinomial
Fissão	Rápido	$0,00193 - 0,00004x$
	Térmico	$0,04137 - 0,00185x + 0,00060x^3 - 0,00064x^4 - 0,00089x^4$
Total	Rápido	$0,61338 - 0,07718x - 0,01119x^2 - 0,01639x^3 - 0,02766x^4$
	Térmico	$1,54754 - 0,31057x - 0,02140x^2 - 0,05058x^3 - 0,08681x^4$
Espalhamento Total	Rápido	$0,60376 - 0,07692x - 0,01117x^2 + 0,01628x^3 - 0,02750x^4$
	Térmico	$1,43401 - 0,29682x - 0,02238x^2 - 0,04855x^3 - 0,08333x^4$
Absorção	Rápido	$0,00967 - 0,00027x - 0,00002x^2 - 0,00011x^3 - 0,00017x^4$
	Térmico	$0,11353 - 0,01374x + 0,00099x^2 - 0,00204x^3 - 0,00350x^4$
Captura	Rápido	$0,00773 - 0,00023x - 0,00002x^2 - 0,00009x^3 - 0,00014x^4$
	Térmico	$0,07215 - 0,01189x + 0,00039x^2 - 0,00139x^3 - 0,00261x^4$
Nu-Fissão	Rápido	$0,00525 - 0,00012x - 0,00001x^2 - 0,00005x^3 - 0,00008x^4$
	Térmico	$0,11127 - 0,00439x + 0,00165x^2 - 0,00176x^3 - 0,00238x^4$
Transporte	Rápido	$0,23480 - 0,01833x - 0,00269x^2 - 0,00386x^3 - 0,00651x^4$
	Térmico	$0,92034 - 0,16392x - 0,01685x^2 - 0,02737x^3 - 0,04831x^4$
Espalhamento 1-1	–	$0,58005 - 0,07224x - 0,01048x^2 - 0,01532x^3 - 0,02586x^4$
Espalhamento 1-2	–	$0,02372 - 0,00468x - 0,00069x^2 - 0,00097x^3 - 0,00164x^4$
Espalhamento 2-2	–	$1,43401 - 0,29682x - 0,02238x^2 - 0,04855x^3 - 0,08333x^4$

A função resultante da expansão dos coeficientes de Tchebyshev, considerando as seções de choque em função da temperatura do combustível, é descrita na EQ. 6.13, abaixo:

$$k_{\infty} = 0,88676 + 0,00992x + 0,00019x^2 - 0,00084x^3 + 0,00033x^4 \quad (6.13)$$

Segue, abaixo, os gráficos apresentados nas FIG. 6.57 a 6.63, do comportamento das seções de choque e fator de multiplicação infinito em função da variação da temperatura do combustível.

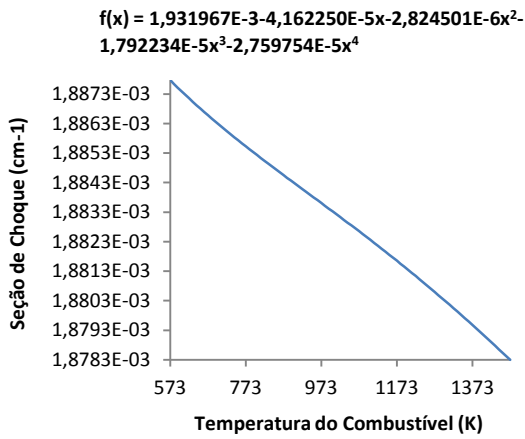


FIG. 6.57 Seção de choque de fissão do grupo rápido.

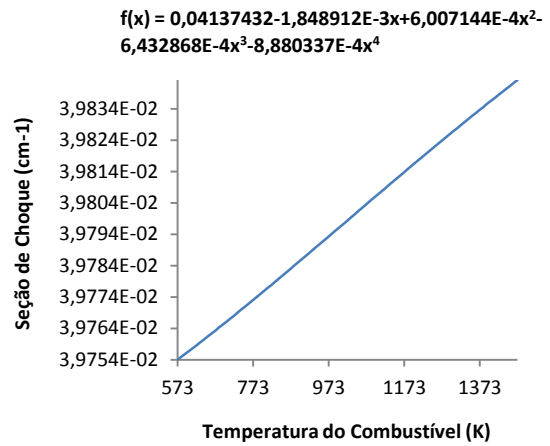


FIG. 6.58 Seção de choque de fissão do grupo térmico.

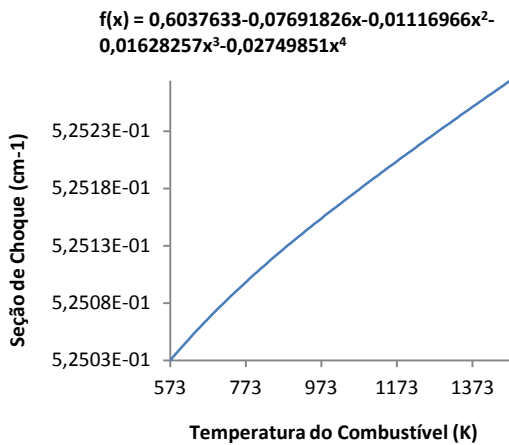


FIG. 6.59 Seção de choque de espalhamento do grupo rápido.

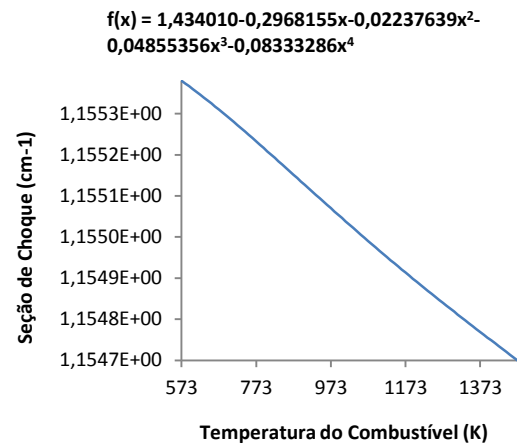


FIG. 6.60 Seção de choque de espalhamento do grupo térmico.

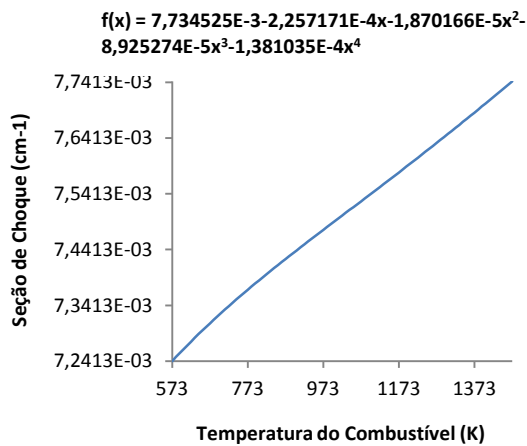


FIG. 6.61 Seção de choque de captura do grupo rápido.

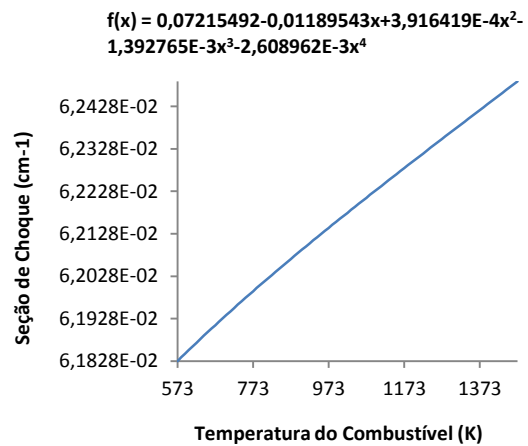


FIG. 6.62 Seção de choque de captura do grupo térmico.

Este aumento ocorrido na seção de choque de espalhamento rápido se dá devido ao aumento do número de elementos pesados presentes no combustível após a sua depleção.

Os comportamentos das expansões de seção de choque de fissão e captura, do grupo rápido e do grupo térmico, estão de acordo com o esperado, já que o aumento da temperatura do combustível conduz a um aumento da captura ressonante do U^{238} devido ao efeito Doppler da ressonância. Ocorre também um decréscimo na alto-blindagem, e por consequência um alargamento da ressonância de absorção.

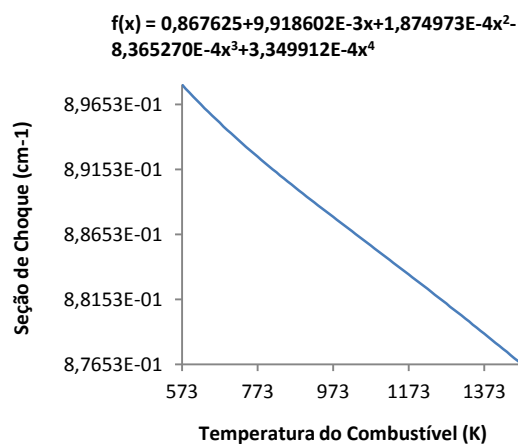


FIG. 6.63 Fator de multiplicação em função da temperatura do combustível.

6.4.2 PARAMETRIZAÇÃO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA E DENSIDADE DO MODERADOR

As funções resultantes da expansão dos coeficientes de Tchebyshev estão descritas na TAB.6.12. Para geração destas funções parametrizadas, geraram-se as seções de choque macroscópicas homogeneizadas variando a temperatura e a densidade do moderador, onde a temperatura variou de 300 a 613 K.

TAB. 6.12 Seções de choque em função da temperatura e densidade do moderador em um EC sem veneno queimável no segundo ciclo de queima.

Seção de Choque	Grupo	Expansão Polinomial
Fissão	Rápido	$0,00193 - 0,00004x - 0,00002x^3 - 0,00003x^4$
	Térmico	$0,04137 - 0,00185x + 0,00060x^2 - 0,00064x^3 - 0,00089x^4$
Total	Rápido	$0,61338 - 0,07718x - 0,01119x^2 - 0,01639x^3 - 0,02766x^4$
	Térmico	$1,54754 - 0,31057x - 0,02140x^2 - 0,05058x^3 - 0,08681x^4$
Espalhamento Total	Rápido	$0,60376 - 0,07692x - 0,01117x^2 - 0,01628x^3 - 0,02750x^4$
	Térmico	$1,43401 - 0,29682x - 0,02238x^2 - 0,04855x^3 - 0,08333x^4$
Absorção	Rápido	$0,00967 - 0,00027x - 0,00002x^2 - 0,00011x^3 - 0,00017x^4$
	Térmico	$0,11353 - 0,01374x + 0,00099x^2 - 0,00204x^3 - 0,00350x^4$
Captura	Rápido	$0,00773 - 0,00023x - 0,00002x^2 - 0,00009x^3 - 0,00014x^4$
	Térmico	$0,07215 - 0,01189x + 0,00039x^2 - 0,00139x^3 - 0,00261x^4$
Nu-Fissão	Rápido	$0,00525 - 0,00012x - 0,00001x^2 - 0,00005x^3 - 0,00008x^4$
	Térmico	$0,11127 - 0,00439x + 0,00165x^2 - 0,00176x^3 - 0,00238x^4$
Transporte	Rápido	$0,23480 - 0,01833x - 0,00269x^2 - 0,00386x^3 - 0,00651x^4$
	Térmico	$0,92034 - 0,16392x - 0,01685x^2 - 0,02737x^3 - 0,04831x^4$
Espalhamento 1-1	–	$0,58005 - 0,07224x - 0,01048x^2 - 0,01532x^3 - 0,02586x^4$
Espalhamento 1-2	–	$0,02372 - 0,00468x - 0,00069x^2 - 0,00097x^3 - 0,00164x^4$
Espalhamento 2-2	–	$1,43031 - 0,29470x - 0,02261x^2 - 0,04832x^3 - 0,08309x^4$

A expansão polinomial do fator de multiplicação infinito, em função da densidade e temperatura do moderador é dada pela função abaixo:

$$k_{\infty} = 0,85469 + 0,04300x + 0,00724x^2 - 0,00453x^3 + 0,00322x^4 \quad (6.14)$$

As FIG. 6.64 a 6.70 apresentam o comportamento das seções de choque e do fator de multiplicação infinito, em função da temperatura e, conseqüentemente, densidade do moderador.

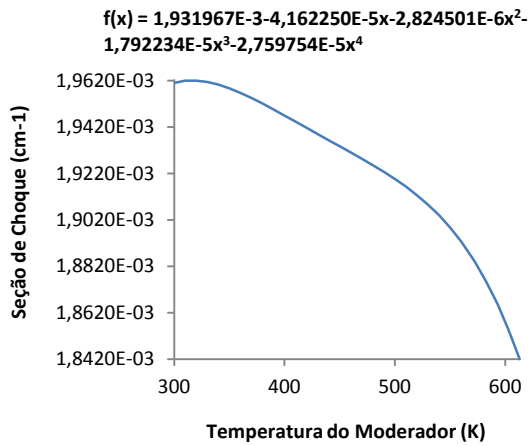


FIG. 6.64 Seção de choque de fissão do grupo rápido.

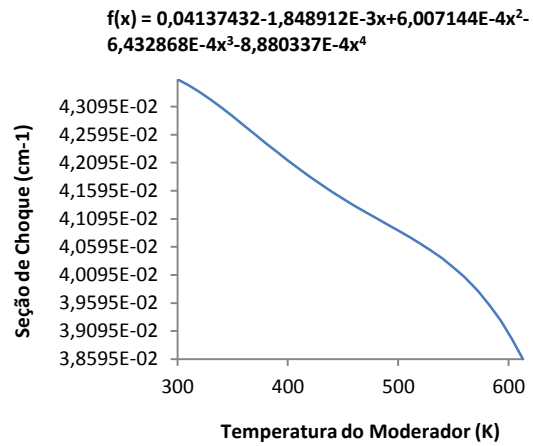


FIG. 6.65 Seção de choque de fissão do grupo térmico.

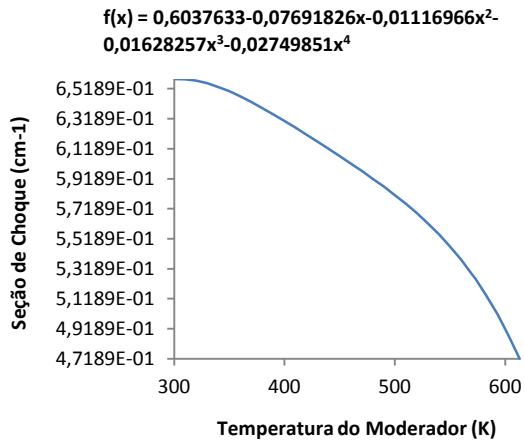


FIG. 6.66 Seção de choque de espalhamento do grupo rápido.

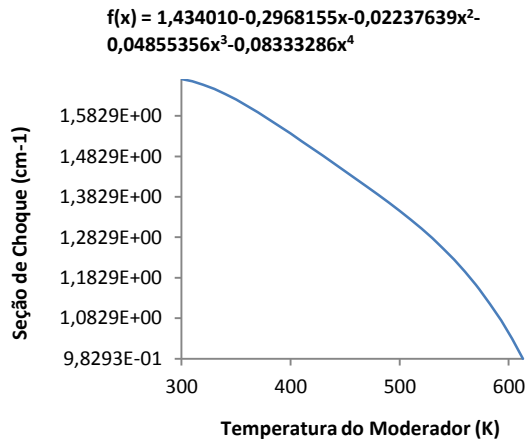


FIG. 6.67 Seção de choque de espalhamento do grupo térmico.

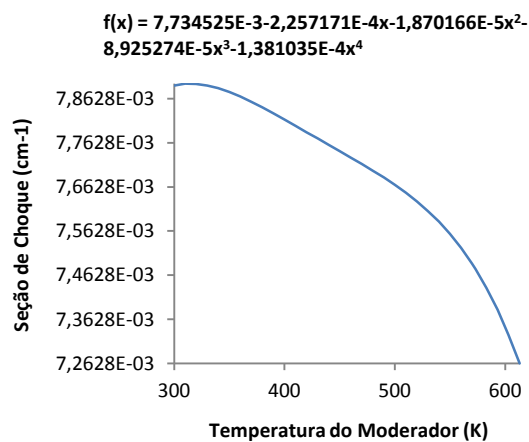


FIG. 6.68 Seção de choque de captura do grupo rápido.

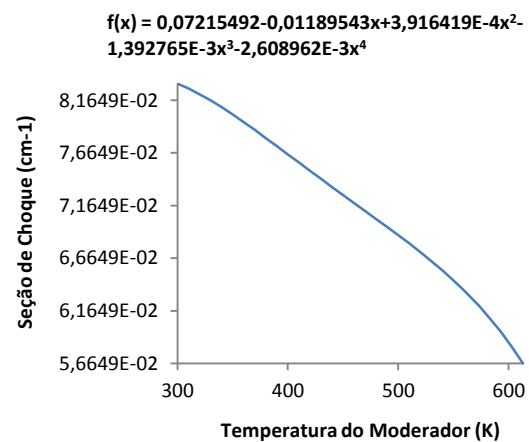


FIG. 6.69 Seção de choque de captura do grupo térmico.

Ao longo da depleção do combustível, novos fragmentos de fissão e actínidos vão sendo gerados e as concentrações dos mesmos vão aumentando. Isso faz com que

diminua o numero de fissões, aumentando assim a taxa de absorção e consequentemente a de captura.

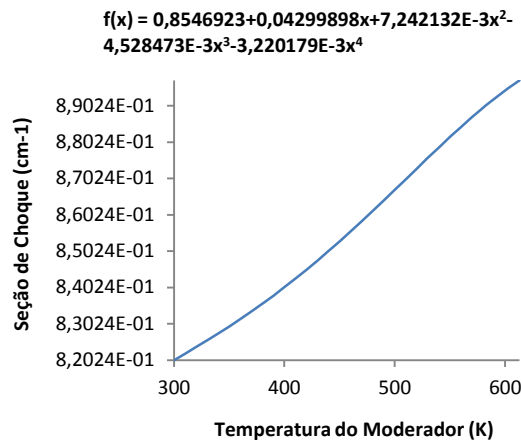


FIG. 6.70 Fator de multiplicação em função da temperatura do moderador.

O aumento da população de nêutrons se dá devido o decréscimo da concentração do boro solúvel. Como a taxa de captura, e consequentemente a taxa de absorção diminuem, não há desaparecimento do nêutron, logo a multiplicação de nêutrons só tende a aumentar.

6.4.3 PARAMETRIZAÇÃO EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE BORO SOLÚVEL

As expansões polinomiais das seções de choque macroscópicas, em função da concentração de boro, estão descritas na TAB. 6.13.

TAB. 6.13 Seções de choque em função da concentração de boro solúvel em um EC sem veneno queimável no segundo ciclo de queima.

Seção de Choque	Grupo	Expansão Polinomial
Fissão	Rápido	0,00188
	Térmico	$0,03925 - 0,00160x + 0,00011x^2 - 0,00001x^3$
Total	Rápido	$0,53444 - 0,00008x$
	Térmico	$1,25272 - 0,01222x + 0,00158x^2 - 0,00014x^3 + 0,00001x^4$
Espalhamento Total	Rápido	$0,52506 - 0,00028x$
	Térmico	$1,14623 - 0,02569x + 0,00217x^2 - 0,00021x^3 + 0,00005x^4$
Absorção	Rápido	$0,00943 + 0,00020x$
	Térmico	$0,10650 + 0,01347x - 0,00064x^2 + 0,00005x^3$
Captura	Rápido	$0,00754 + 0,00020x$
	Térmico	$0,06725 + 0,01508x - 0,00075x^2 + 0,00006x^3 - 0,00001x^4$
Nu-Fissão	Rápido	$0,00511 - 0,00001x$
	Térmico	$0,10603 - 0,00421x + 0,00029x^2 - 0,00002x^3$
Transporte	Rápido	$0,21606 - 0,0003x - 0,00001x^2$
	Térmico	$0,75835 - 0,01283x + 0,00197x^2 - 0,00023x^3 + 0,00003x^4$
Espalhamento 1-1	–	$0,50617 - 0,00011x$
Espalhamento 1-2	–	$0,01889 - 0,00017x$
Espalhamento 2-2	–	$1,14623 - 0,02569x + 0,00217x^2 - 0,00021x^3 + 0,00005x^4$

A EQ. 6.15 descreve o comportamento do fator de multiplicação infinito obtido através da variação da concentração de boro solúvel. O aumento da absorção de nêutrons e consequente diminuição do número de fissões faz com que haja a diminuição da população de nêutrons, diminuindo assim o fator de multiplicação infinito.

$$k_{\infty} = 0,84613 - 0,11775x + 0,02101x^2 - 0,00400x^3 + 0,00067x^4 \quad (6.15)$$

As FIG. 6.71 a 6.77 descrevem o comportamento das seções de choque e fator de multiplicação analisados, frente à variação da concentração de boro solúvel.

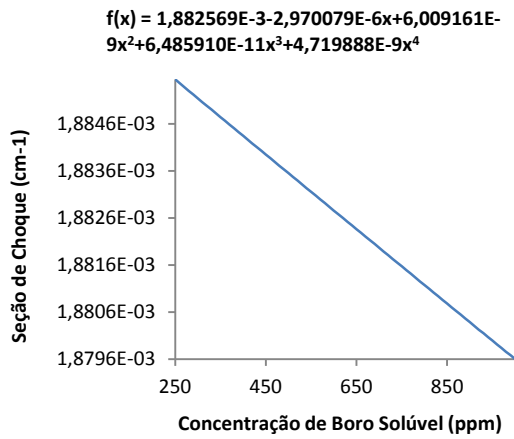


FIG. 6.71 Seção de choque de fissão do grupo rápido.

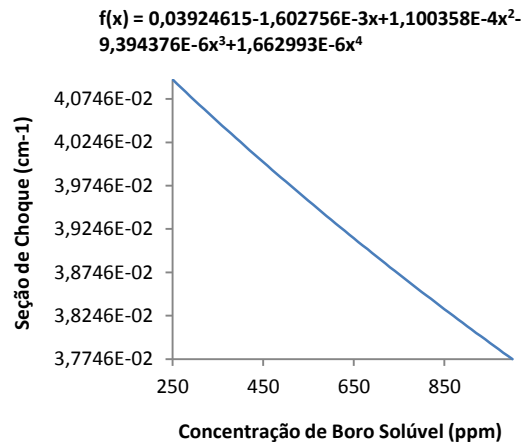


FIG. 6.72 Seção de choque de fissão do grupo térmico.

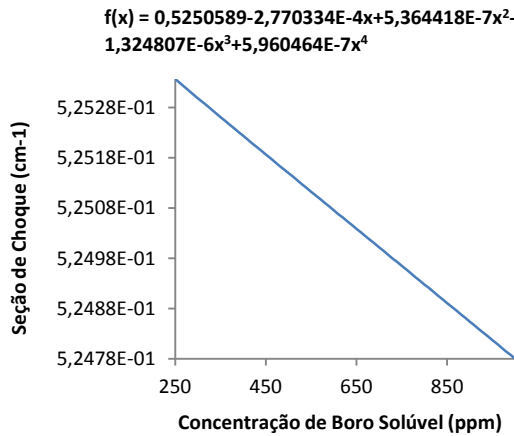


FIG. 6.73 Seção de choque de espalhamento do grupo rápido.

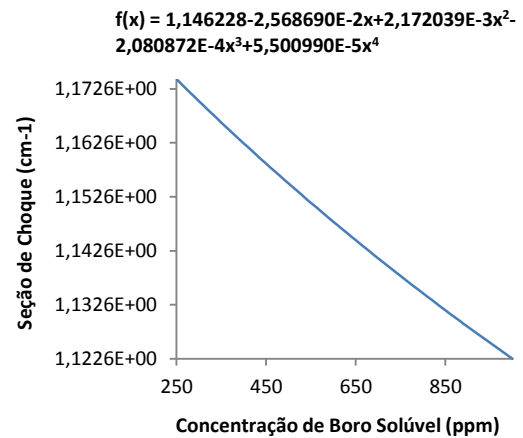


FIG. 6.74 Seção de choque de espalhamento do grupo térmico.

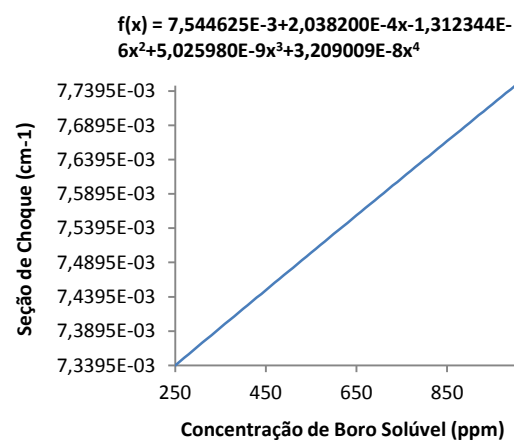


FIG. 6.75 Seção de choque de captura do grupo rápido.

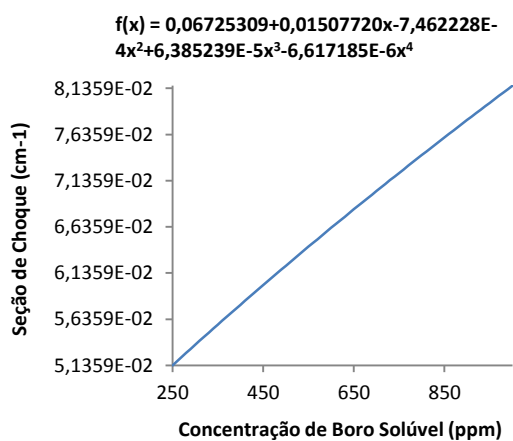


FIG. 6.76 Seção de choque de captura do grupo térmico.

Análogo à seção de choque de absorção, há um aumento na taxa de captura de nêutrons.

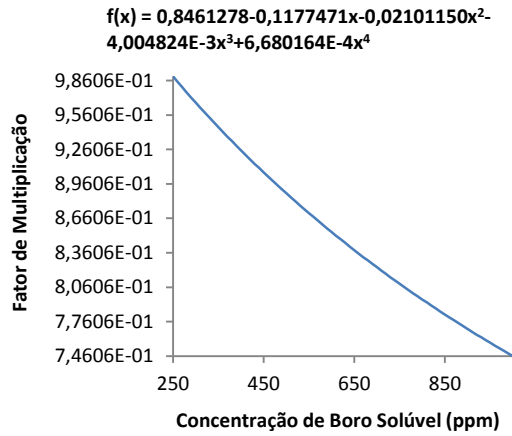


FIG. 6.77 Fator de multiplicação em função da concentração de boro solúvel.

6.4.4 PARAMETRIZAÇÃO EM FUNÇÃO DO ENRIQUECIMENTO DE ${}^{235}_{92}\text{U}$

As equações parametrizadas das seções de choque macroscópicas, em função da concentração de ${}^{235}_{92}\text{U}$, estão representadas na TAB. 6.14. A concentração de urânio variou de 2 a 5 %.

O aumento do enriquecimento de ${}^{235}_{92}\text{U}$ faz com que haja um aumento da taxa de fissão, pois há uma maior concentração de núcleos físséis.

TAB. 6.14 Seções de choque em função da concentração do enriquecimento de urânio em um EC sem veneno queimável no segundo ciclo de queima.

Seção de Choque	Grupo	Expansão Polinomial
Fissão	Rápido	$0,00204 + 0,00049x + 0,00004x^2 - 0,00002x^3$
	Térmico	$0,04342 + 0,01096x - 0,00011x^2 - 0,00040x^3 + 0,00010x^4$
Total	Rápido	$0,53440 - 0,00022x - 0,00003x^2 + 0,00003x^3 - 0,00009x^4$
	Térmico	$1,25566 - 0,00367x + 0,00087x^2 + 0,00013x^3 - 0,00010x^4$
Espalhamento Total	Rápido	$0,52487 - 0,00087x - 0,00007x^2 + 0,00005x^3 - 0,00009x^4$
	Térmico	$1,15023 - 0,01427x + 0,00068x^2 + 0,00057x^3 - 0,00024x^4$
Absorção	Rápido	$0,00957 + 0,00065x + 0,00005x^3 - 0,00002x^3$
	Térmico	$0,10542 + 0,01061x + 0,00026x^2 - 0,00045x^3 + 0,00008x^4$
Captura	Rápido	$0,00753 + 0,00015x + 0,00001x^2$
	Térmico	$0,06201 - 0,00035x + 0,00014x^2 - 0,00005x^3 - 0,00002x^4$
Nu-Fissão	Rápido	$0,00550 + 0,00119x + 0,00010x^2 - 0,00004x^3$
	Térmico	$0,11608 + 0,02603x + 0,00026x^2 - 0,00098x^3 + 0,00022x^4$
Transporte	Rápido	$0,21608 + 0,00001x - 0,00003x^2 + 0,00002x^3 - 0,00006x^4$
	Térmico	$0,75866 - 0,01224x + 0,00122x^2 + 0,00042x^3 - 0,00023x^4$
Espalhamento 1-1	–	$0,50608 - 0,00040x - 0,00004x^2 + 0,00003x^3 + 0,00009x^4$
Espalhamento 1-2	–	$0,01880 - 0,00047x - 0,00003x^2 + 0,00001x^3$
Espalhamento 2-2	–	$1,15023 - 0,01427x + 0,00068x^2 + 0,00057x^3 - 0,00024x^4$

As funções descritas a partir da variação do enriquecimento do urânio revelam um aumento um aumento na taxa de absorção, tanto na faixa rápida como na faixa térmica de energia, visto que há um aumento nas taxas de captura e de fissão.

A parametrização do fator de multiplicação infinito, em função do enriquecimento do $^{235}_{92}\text{U}$ é dada pela função abaixo:

$$k_{\infty} = 0,92501 + 0,10834x - 0,01055x^2 - 0,00324x^3 + 0,00209x^4 \quad (6.16)$$

Os gráficos apresentados nas FIG. 6.78 a 6.84 demonstram o comportamento das seções de choque analisadas, assim como o comportamento do fator de multiplicação infinito.

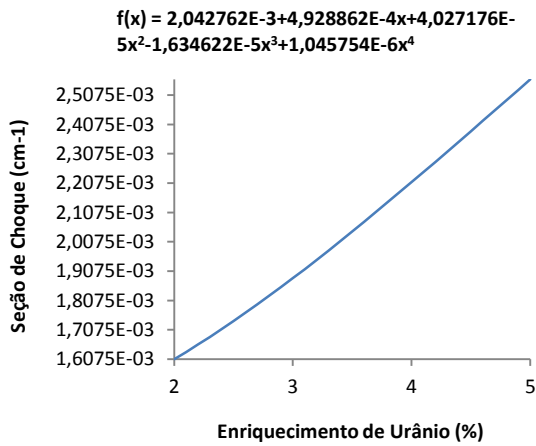


FIG. 6.78 Seção de choque de fissão do grupo rápido.

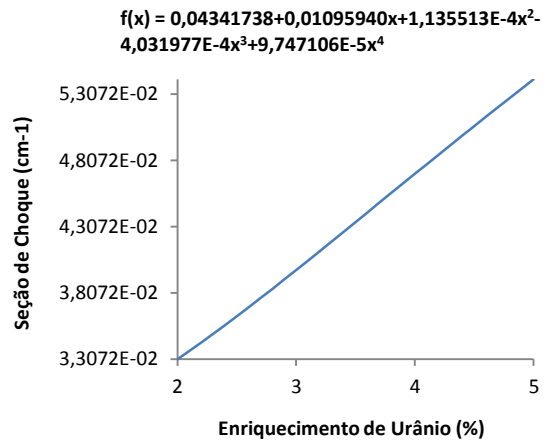


FIG. 6.79 Seção de choque de fissão do grupo térmico.

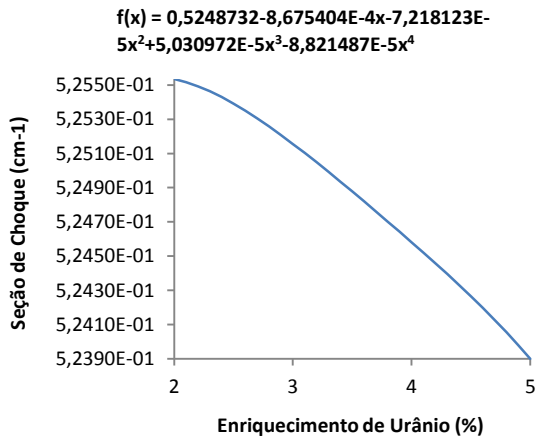


FIG. 6.80 Seção de choque de espalhamento do grupo rápido.

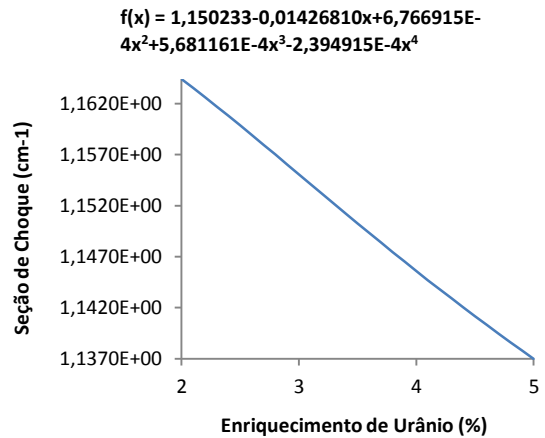


FIG. 6.81 Seção de choque de espalhamento do grupo térmico.

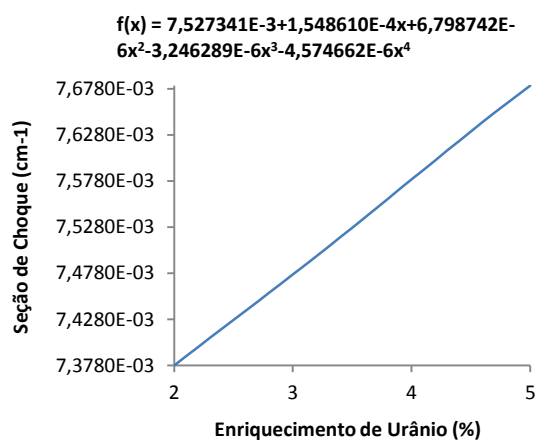


FIG. 6.82 Seção de choque de captura do grupo rápido.

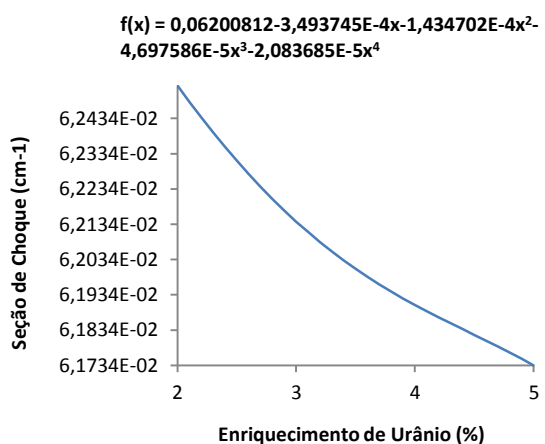


FIG. 6.83 Seção de choque de captura do grupo térmico.

Quanto maior o enriquecimento, maior será a geração de produtos de fissão e actínídeos que irão capturar os nêutrons, aumentando a taxa absorção e

consequentemente diminuindo a taxa de espalhamento.

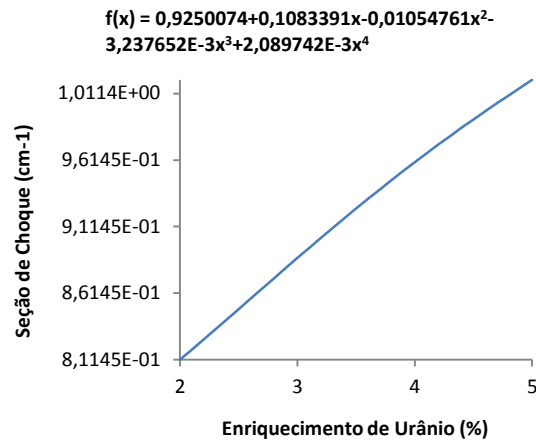


FIG. 6.84 Fator de multiplicação em função do enriquecimento de urânio.

Quanto mais fissões ocorrem dentro do reator, mais nêutrons serão gerados, aumentando a sua população.

6.5 CICLO 3

A nova composição referente à depleção do combustível do ciclo 2 está apresentada na TAB. 6.15. .

Pode ser observado que há um aumento da concentração dos produtos de fissão, assim como de actínídeos, e o decréscimo do urânio enriquecido, em relação ao ciclo anterior.

TAB. 6.15 Composições isotópicas dos núclídeos no terceiro ciclo de queima em um EC sem veneno queimável.

Nuclídeo	Number Density (atom/b-cm) x Enriquecimento de Urânio (%)				
	2 %	2,5 %	3 %	4 %	5 %
$^{234}_{92}\text{U}$	3,3110E-08	3,9560E-08	4,6240E-08	6,0280E-08	7,4610E-08
$^{235}_{92}\text{U}$	7,9630E-05	1,2260E-04	1,7550E-04	3,0710E-04	4,6510E-04
$^{236}_{92}\text{U}$	6,1460E-05	7,5650E-05	8,8680E-05	1,1110E-04	1,2950E-04
$^{238}_{92}\text{U}$	2,1970E-02	2,1910E-02	2,1840E-02	2,1690E-02	2,1520E-02
$^{238}_{94}\text{Pu}$	2,0290E-06	1,9840E-06	1,9040E-06	1,7120E-06	1,5240E-06
$^{239}_{94}\text{Pu}$	1,4000E-04	1,4300E-04	1,4620E-04	1,5300E-04	1,5900E-04
$^{240}_{94}\text{Pu}$	6,3790E-05	6,0960E-05	5,8000E-05	5,2220E-05	4,6940E-05
$^{241}_{94}\text{Pu}$	3,9350E-05	3,8220E-05	3,7010E-05	3,4420E-05	3,1700E-05
$^{242}_{94}\text{Pu}$	1,8360E-05	1,5730E-05	1,3430E-05	9,8580E-06	7,3560E-06
$^{243}_{94}\text{Pu}$	6,1290E-09	5,1260E-09	4,2420E-09	2,9040E-09	2,0160E-09
$^{241}_{95}\text{Am}$	1,0960E-06	1,0910E-06	1,0840E-06	1,0540E-06	1,0030E-06
$^{242}_{95}\text{Am}^*$	1,6160E-08	1,6250E-08	1,6300E-08	1,6160E-08	1,5600E-08
$^{243}_{95}\text{Am}$	4,8330E-06	3,9160E-06	3,1680E-06	2,1070E-06	1,4410E-06
$^{242}_{96}\text{Cm}$	4,6520E-07	4,2100E-07	3,7810E-07	3,0210E-07	2,4100E-07
$^{243}_{96}\text{Cm}$	1,2160E-08	1,0350E-08	8,7420E-09	6,2350E-09	4,5050E-09
$^{244}_{96}\text{Cm}$	2,0400E-06	1,5020E-06	1,1120E-06	6,3290E-07	3,7990E-07
$^{245}_{96}\text{Cm}$	1,4630E-07	1,0410E-07	7,4480E-08	3,9760E-08	2,2490E-08
$^{95}_{42}\text{Mo}$	2,4900E-05	2,5750E-05	2,6480E-05	2,7650E-05	2,8500E-05
$^{99}_{43}\text{Tc}$	4,4570E-05	4,5350E-05	4,6040E-05	4,7160E-05	4,8030E-05
$^{101}_{44}\text{Ru}$	4,4950E-05	4,4920E-05	4,4890E-05	4,4860E-05	4,4850E-05
$^{103}_{45}\text{Rh}$	2,2820E-05	2,2510E-05	2,2230E-05	2,1840E-05	2,1550E-05
$^{109}_{47}\text{Ag}$	4,8880E-06	4,4920E-06	4,1230E-06	3,4930E-06	2,9980E-06
$^{133}_{55}\text{Cs}$	4,5720E-05	4,6510E-05	4,7220E-05	4,8410E-05	4,9360E-05
$^{143}_{60}\text{Nd}$	2,6560E-05	2,8350E-05	3,0020E-05	3,2970E-05	3,5310E-05
$^{145}_{60}\text{Nd}$	2,4320E-05	2,5170E-05	2,5940E-05	2,7210E-05	2,8170E-05
$^{147}_{62}\text{Sm}$	1,0150E-06	1,0670E-06	1,1150E-06	1,2000E-06	1,2690E-06
$^{149}_{62}\text{Sm}$	6,7450E-08	7,2500E-08	7,8830E-08	9,4550E-08	1,1360E-07
$^{150}_{62}\text{Sm}$	9,9020E-06	9,8640E-06	9,8280E-06	9,7640E-06	9,7020E-06
$^{151}_{62}\text{Sm}$	4,0770E-07	4,2690E-07	4,5050E-07	5,0910E-07	5,7770E-07
$^{152}_{62}\text{Sm}$	3,7690E-06	3,7720E-06	3,7750E-06	3,7830E-06	3,7900E-06
$^{153}_{63}\text{Eu}$	4,7810E-06	4,6480E-06	4,5140E-06	4,2680E-06	4,0500E-06
$^{155}_{64}\text{Gd}$	1,9650E-09	2,0100E-09	2,0720E-09	2,2250E-09	2,3860E-09
$^{16}_{8}\text{O}$	4,6450E-02	4,6450E-02	4,6460E-02	4,6460E-02	4,6470E-02

6.5.1 PARAMETRIZAÇÃO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DO COMBUSTÍVEL

Utilizando como composição para o combustível os dados apresentados na TAB. 6.15, foi possível processar as seções de choque em função da temperatura do combustível. As expansões polinomiais que representam o comportamento das seções de choque estão descritas na tabela 6.16, abaixo:

TAB. 6.16 Seções de choque em função da temperatura do combustível em um EC sem veneno queimável no terceiro ciclo de queima.

Seção de Choque	Grupo	Expansão Polinomial
Fissão	Rápido	0,00174
	Térmico	0,03716 + 0,00009x
Total	Rápido	0,53371 + 0,00034x - 0,00001x ² + 0,00003x ³ - 0,00001x ⁴
	Térmico	1,26099 + 0,00012x - 0,00001x ² + 0,00003x ³
Espalhamento Total	Rápido	0,52441 + 0,00011x - 0,00001x ² + 0,00001x ³
	Térmico	1,15764 - 0,00036x - 0,00001x ² + 0,00002x ³ + 0,00001x ⁴
Absorção	Rápido	0,00935 - 0,00023x + 0,00002x ³ - 0,00001x ⁴
	Térmico	0,10335 + 0,00048x - 0,00001x ² + 0,00001x ³
Captura	Rápido	0,00761 + 0,00023x + 0,00002x ³ - 0,00001x ⁴
	Térmico	0,06619 + 0,00039x - 0,00001x ² + 0,00001x ³
Nu-Fissão	Rápido	0,00480 - 0,00001x
	Térmico	0,10267 + 0,00028x
Transporte	Rápido	0,21526 - 0,00006x - 0,00001x ² - 0,00001x ³
	Térmico	0,76865 + 0,00013x - 0,00001x ² + 0,00002x ³
Espalhamento 1-1	-	0,50551 + 0,00028x - 0,00001x ² + 0,00003x ³ - 0,00001x ⁴
Espalhamento 1-2	-	0,01890 - 0,00017x - 0,00001x ³ + 0,00001x ⁴
Espalhamento 2-2	-	1,15764 - 0,00036x - 0,00001x ² + 0,00002x ³ + 0,00001x ⁴

A função resultante da expansão dos coeficientes de Tchebyshev, considerando as seções de choque em função da temperatura do combustível, é descrita na EQ. 6.17, abaixo:

$$k_{\infty} = 0,83599 - 0,00937x + 0,00015x^2 - 0,00081x^3 + 0,00032x^4 \quad (6.17)$$

Segue, abaixo, os gráficos apresentados nas FIG. 6.85 a 6.91, do comportamento das seções de choque e fator de multiplicação infinito em função da variação da temperatura do combustível.

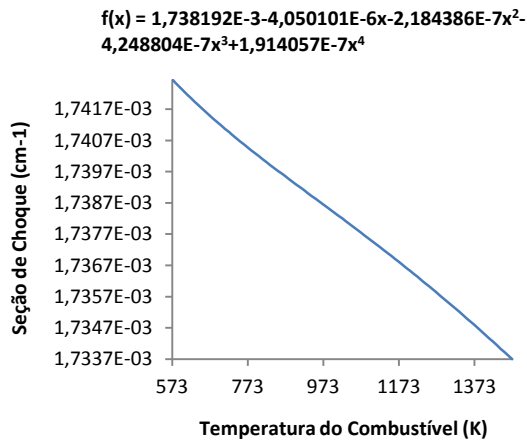


FIG. 6.85 Seção de choque de fissão do grupo rápido.

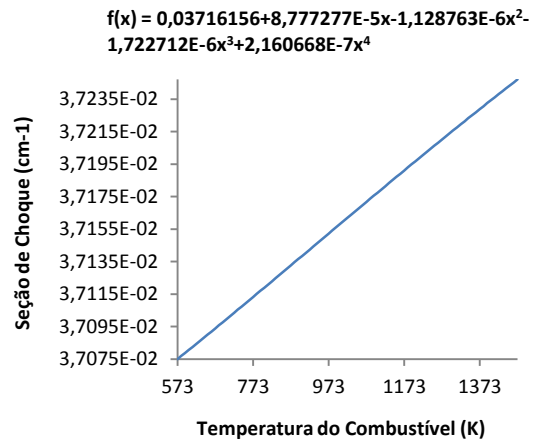


FIG. 6.86 Seção de choque de fissão do grupo térmico.

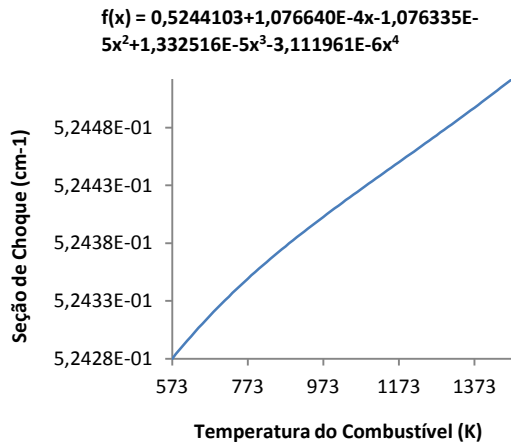


FIG. 6.87 Seção de choque de espalhamento do grupo rápido.

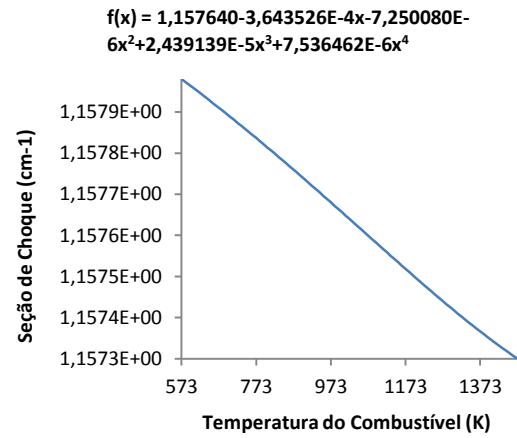


FIG. 6.88 Seção de choque de espalhamento do grupo térmico.

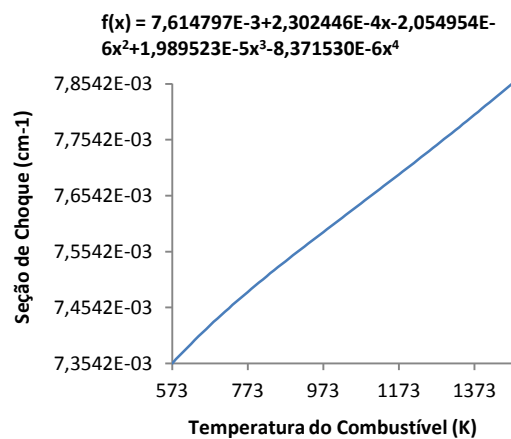


FIG. 6.89 Seção de choque de captura do grupo rápido.

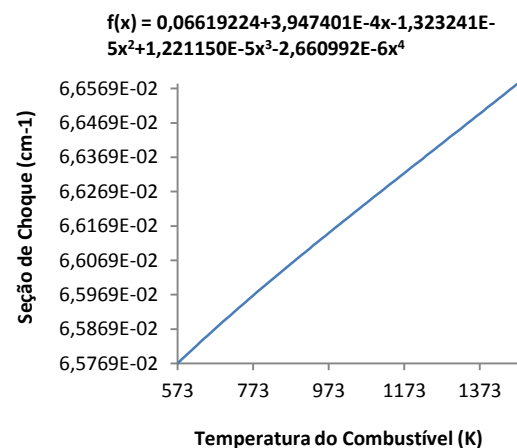


FIG. 6.90 Seção de choque de captura do grupo térmico.

Os comportamentos das expansões de seção de choque de fissão e captura, do grupo rápido e do grupo térmico, estão de acordo com o esperado, já que o aumento

da temperatura do combustível conduz a um aumento da captura ressonante do U^{238} devido ao efeito Doppler da ressonância. Ocorre também um decréscimo na alto-blindagem, e por consequência um alargamento da ressonância de absorção.

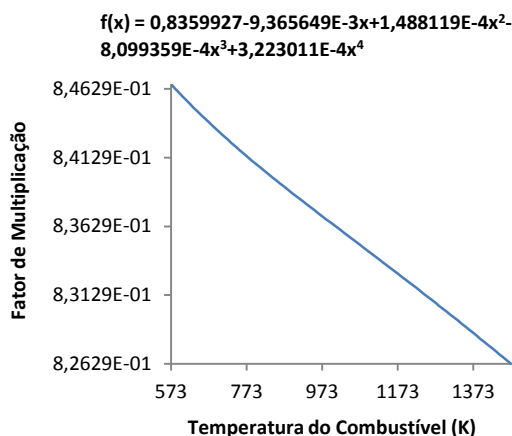


FIG. 6.91 Fator de multiplicação em função da temperatura do combustível.

6.5.2 PARAMETRIZAÇÃO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA E DENSIDADE DO MODERADOR

As funções resultantes da expansão dos coeficientes de Tchebyshev, frente à variação da temperatura e a densidade do moderador, estão descritas na TAB.6.17.

TAB. 6.17 Seções de choque em função da temperatura e densidade do moderador em um EC sem veneno queimável no terceiro ciclo de queima.

Seção de Choque	Grupo	Expansão Polinomial
Fissão	Rápido	$0,00179 - 0,00004x - 0,00002x^3 - 0,00003x^4$
	Térmico	$0,03821 - 0,00118x + 0,00059x^2 - 0,00063x^3 - 0,00082x^4$
Total	Rápido	$0,61251 - 0,07710x - 0,01118x^2 - 0,01637x^3 - 0,02764x^4$
	Térmico	$1,55210 - 0,31149x - 0,02105x^2 - 0,05071x^3 - 0,08686x^4$
Espalhamento Total	Rápido	$0,60293 - 0,07684x - 0,01116x^2 - 0,01626x^3 - 0,02747x^4$
	Térmico	$1,43774 - 0,29834x - 0,02210x^2 - 0,04871x^3 - 0,08349x^4$
Absorção	Rápido	$0,00964 - 0,00027x - 0,00002x^2 - 0,00011x^3 - 0,00017x^4$
	Térmico	$0,11436 - 0,01315x + 0,00108x^2 - 0,00200x^3 - 0,00338x^4$
Captura	Rápido	$0,00785 - 0,00023x - 0,00002x^2 - 0,00009x^3 - 0,00014x^4$
	Térmico	$0,07614 - 0,01197x + 0,00049x^2 - 0,00137x^3 - 0,00257x^4$

Nu-Fissão	Rápido	$0,00494 - 0,00012x - 0,00001x^2 - 0,00005x^3 - 0,00008x^4$
	Térmico	$0,10525 - 0,00282x + 0,00165x^2 - 0,00177x^3 - 0,00225x^4$
Transporte	Rápido	$0,23395 - 0,01828x - 0,00269x^2 - 0,00385x^3 - 0,00649x^4$
	Térmico	$0,92772 - 0,16614x - 0,01653x^2 - 0,02750x^3 - 0,04858x^4$
Espalhamento 1-1	–	$0,57925 - 0,07216x - 0,01047x^2 - 0,01530x^3 - 0,02583x^4$
Espalhamento 1-2	–	$0,02367 - 0,00467x - 0,00069x^2 - 0,00096x^3 - 0,00164x^4$
Espalhamento 2-2	–	$1,43774 - 0,29834x - 0,02210x^2 - 0,04871x^3 - 0,08349x^4$

A equação 6.18 descreve o comportamento do fator de multiplicação infinito, em função da densidade e temperatura do moderador, conforme:

$$k_{\infty} = 0,80344 + 0,04470x + 0,00702x^2 - 0,00554x^3 + 0,00420x^4 \quad (6.18)$$

As FIG. 6.92 a 6.98 apresentam o comportamento das seções de choque e do fator de multiplicação infinito, em função da temperatura e, conseqüentemente, densidade do moderador.

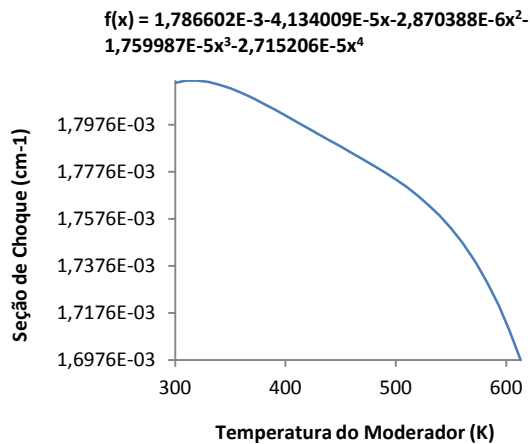


FIG. 6.92 Seção de choque de fissão do grupo rápido.

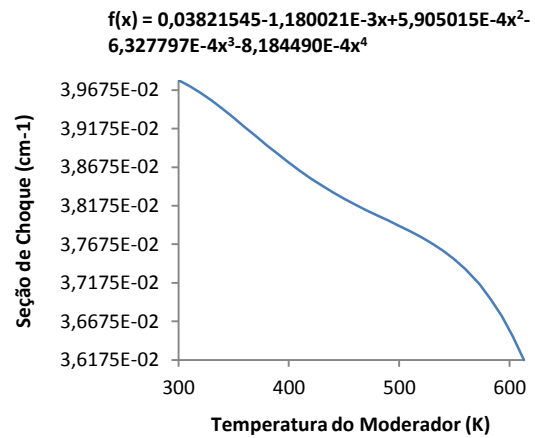


FIG. 6.93 Seção de choque de fissão do grupo térmico.

Aumentando a temperatura do moderador faz com que a densidade diminua, aumentando o livre caminho médio do meio, dificultando o espalhamento e a captura, mostrada nos gráficos 6.94 a 6.97.

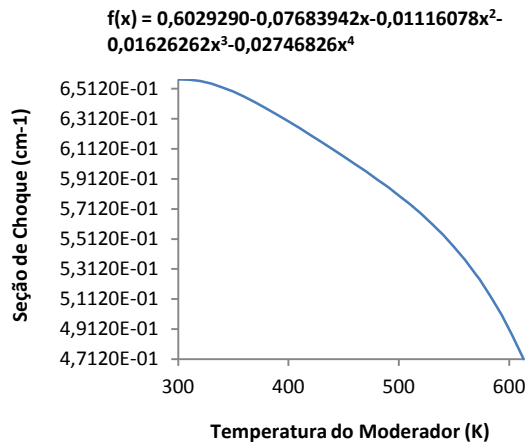


FIG. 6.94 Seção de choque de espalhamento do grupo rápido.

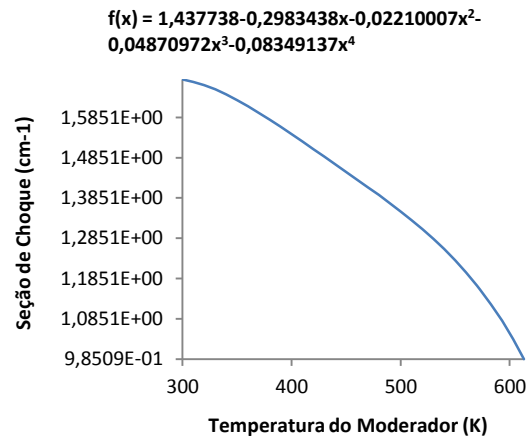


FIG. 6.95 Seção de choque de espalhamento do grupo térmico.

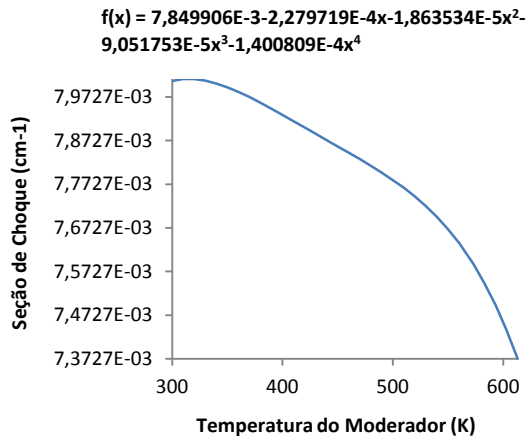


FIG. 6.96 Seção de choque de captura do grupo rápido.

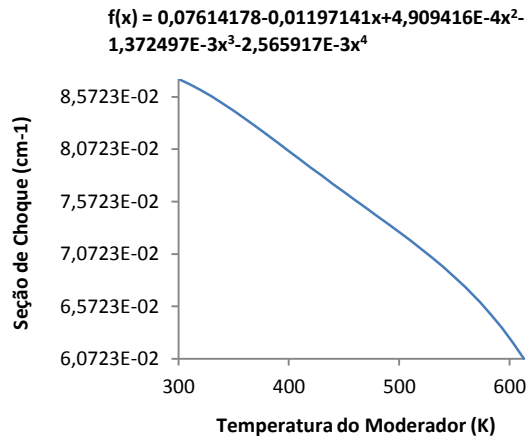


FIG. 6.97 Seção de choque de captura do grupo térmico.

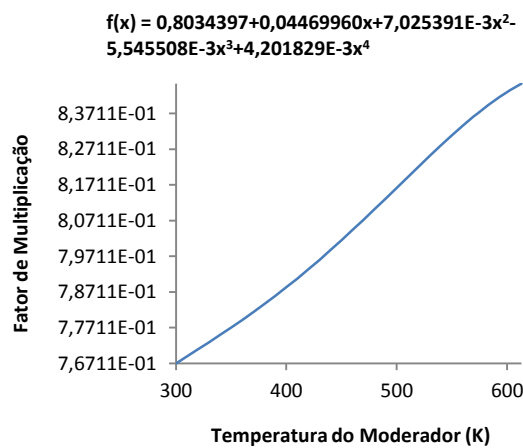


FIG. 6.98 Fator de multiplicação em função da temperatura do moderador.

6.5.3 PARAMETRIZAÇÃO EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE BORO SOLÚVEL

As expansões polinomiais das seções de choque macroscópicas, em função da concentração de boro, variando de 250 a 1000 ppm, estão descritas na TAB. 6.18.

Pode-se observar que ao aumentar a concentração do $^{10}_5B$, que é um sequestrante de nêutrons, aumenta-se a taxa de absorção, conseqüentemente diminuindo a fissão e aumentando a captura.

TAB. 6.18 Seções de choque em função da concentração de boro solúvel em um EC sem veneno queimável no terceiro ciclo de queima.

Seção de Choque	Grupo	Expansão Polinomial
Fissão	Rápido	0,00174
	Térmico	$0,03667 - 0,00141x + 0,00009x^2 - 0,00001x^3$
Total	Rápido	$0,53365 - 0,00008x$
	Térmico	$1,25677 - 0,01209x + 0,00159x^2 - 0,00013x^3 + 0,00001x^4$
Espalhamento Total	Rápido	$0,52430 - 0,00028x + 0,00001x^2 - 0,00001x^4$
	Térmico	$1,14876 - 0,02600x + 0,00222x^2 - 0,00020x^3 + 0,00005x^4$
Absorção	Rápido	$0,00939 + 0,00020x$
	Térmico	$0,10802 + 0,01392x - 0,00067x^2 + 0,00006x^3$
Captura	Rápido	$0,00766 + 0,00020x$
	Térmico	$0,07135 + 0,01533x - 0,00077x^2 + 0,00006x^3 - 0,00001x^4$
Nu-Fissão	Rápido	$0,00480 - 0,00001x$
	Térmico	$0,10135 - 0,00381x + 0,00025x^2 - 0,00002x^3$
Transporte	Rápido	$0,21526 - 0,00003x$
	Térmico	$0,76406 - 0,01301x + 0,00202x^2 - 0,00023x^3 + 0,00003x^4$
Espalhamento 1-1	–	$0,50544 - 0,00011x + 0,00001x^2 - 0,00001x^4$
Espalhamento 1-2	–	$0,01886 - 0,00017x$
Espalhamento 2-2	–	$1,14876 - 0,02600x + 0,00222x^2 - 0,00020x^3 + 0,00005x^4$

A EQ. 6.19 descreve o comportamento do fator de multiplicação infinito obtido através da variação da concentração de boro solúvel, conforme:

$$k_{\infty} = 0,79760 - 0,11115x + 0,02011x^2 - 0,00391x^3 + 0,00067x^4 \quad (6.19)$$

As FIG. 6.99 a 6.105 descrevem o comportamento das seções de choque e fator de multiplicação analisados, frente à variação da concentração de boro solúvel.

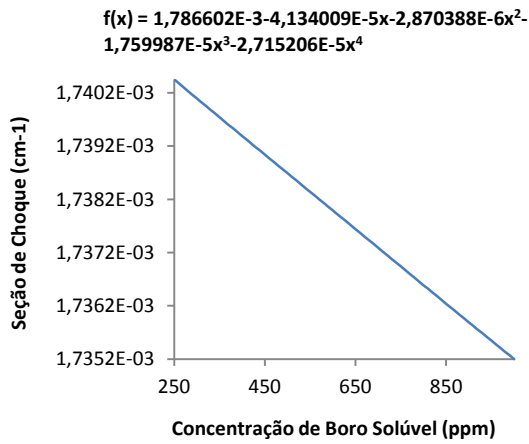


FIG. 6.99 Seção de choque de fissão do grupo rápido.

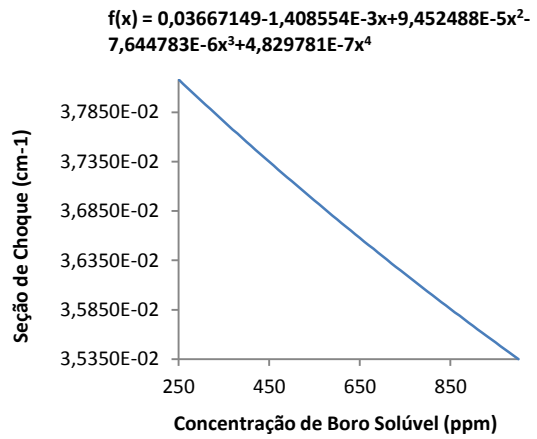


FIG. 6.100 Seção de choque de fissão do grupo térmico.

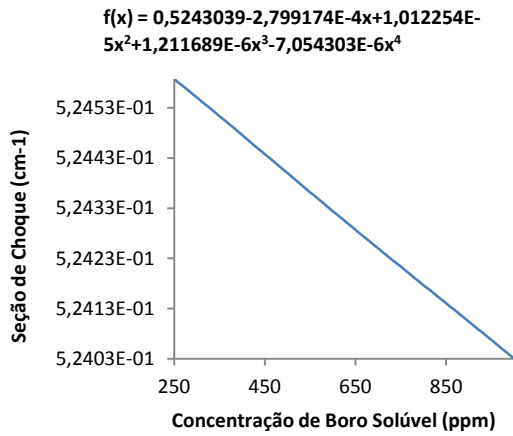


FIG. 6.101 Seção de choque de espalhamento do grupo rápido.

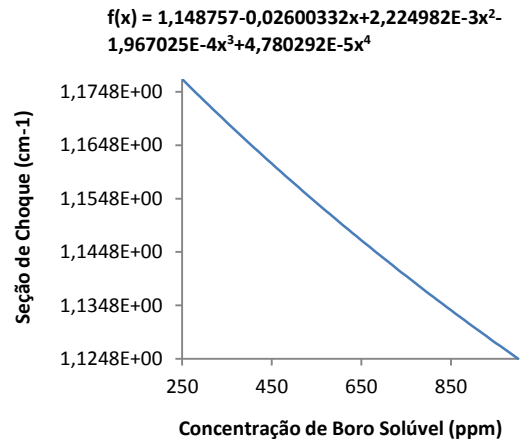


FIG. 6.102 Seção de choque de espalhamento do grupo térmico.

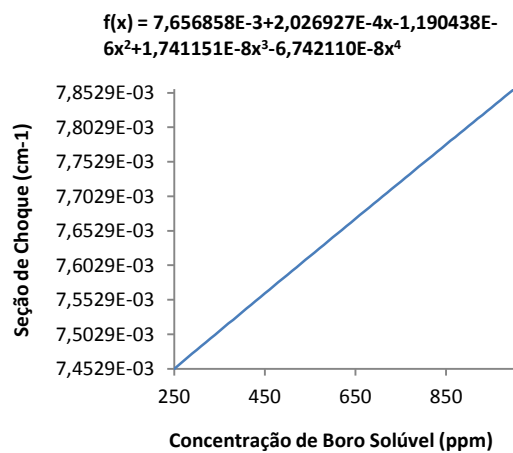


FIG. 6.103 Seção de choque de captura do grupo rápido.

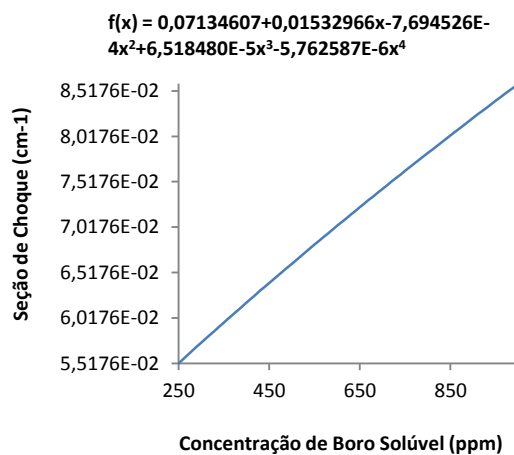


FIG. 6.104 Seção de choque de captura do grupo térmico.

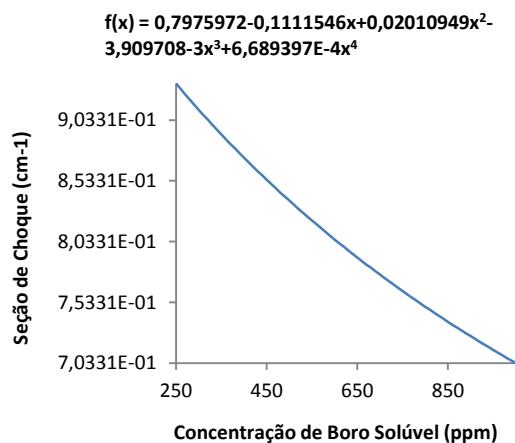


FIG. 6.105 Fator de multiplicação em função da concentração de boro solúvel.

O aumento da concentração do sequestrante de nêutrons faz com que a população de nêutrons caia, conforme mostrado na FIG. 6.105.

6.5.4 PARAMETRIZAÇÃO EM FUNÇÃO DO ENRIQUECIMENTO DE ${}^{235}_{92}\text{U}$

As equações parametrizadas das seções de choque macroscópicas, em função da concentração de ${}^{235}_{92}\text{U}$, estão representadas na TAB. 6.19. Avaliou-se o intervalo de concentração de 2 a 5 % de enriquecimento do urânio. Este intervalo foi escolhido, pois no reator de ANGRA II, há estes valores de enriquecimento para os diferentes elementos combustíveis que compunham o núcleo.

TAB. 6.19 Seções de choque em função da concentração do enriquecimento de urânio em um EC sem veneno queimável no terceiro ciclo de queima.

Seção de Choque	Grupo	Expansão Polinomial
Fissão	Rápido	$0,00186 + 0,00040x + 0,00006x^2 - 0,00001x^3$
	Térmico	$0,04019 + 0,00947x + 0,00089x^2 - 0,00047x^3 - 0,00001x^4$
Total	Rápido	$0,53366 - 0,00007x - 0,00011x^2 - 0,00001x^3 + 0,00001x^4$
	Térmico	$1,25990 - 0,00313x + 0,00041x^2 + 0,00019x^3 - 0,00006x^4$
Espalhamento Total	Rápido	$0,52421 - 0,00062x - 0,00018x^2 + 0,00001x^3 - 0,00001x^4$
	Térmico	$1,15357 - 0,01262x + 0,00064x^2 + 0,00071x^3 - 0,00002x^4$
Absorção	Rápido	$0,00950 + 0,00054x + 0,00007x^3 - 0,00002x^3$
	Térmico	$0,10633 + 0,00949x + 0,00103x^2 - 0,00053x^3 - 0,00006x^4$
Captura	Rápido	$0,00763 + 0,00014x + 0,00001x^2$
	Térmico	$0,06614 + 0,00002x + 0,00014x^2 - 0,00006x^3 - 0,00005x^4$
Nu-Fissão	Rápido	$0,00511 + 0,00097x + 0,00015x^2 - 0,00004x^3$
	Térmico	$0,10996 + 0,02279x + 0,00211x^2 - 0,00116x^3 - 0,00004x^4$
Transporte	Rápido	$0,21530 + 0,00008x - 0,00007x^2 - 0,00001x^3 + 0,00001x^4$
	Térmico	$0,76492 - 0,01120x + 0,00005x^2 + 0,00059x^3 - 0,00009x^4$
Espalhamento 1-1	–	$0,50542 - 0,00023x - 0,00013x^2 + 0,00001x^4$
Espalhamento 1-2	–	$0,01879 - 0,00039x - 0,00005x^2 + 0,00001x^3$
Espalhamento 2-2	–	$1,15357 - 0,01262x + 0,00064x^2 + 0,00071x^3 - 0,00002x^4$

As funções descritas a partir da variação do enriquecimento do urânio revelam um aumento um aumento na taxa de absorção, tanto na faixa rápida como na faixa térmica de energia, visto que há um aumento nas taxas de captura e de fissão.

A parametrização do fator de multiplicação infinito, em função do enriquecimento do ${}^{235}_{92}\text{U}$ é dada pela função abaixo:

$$k_{\infty} = 0,86900 + 0,09657x + 0,00010x^2 - 0,00545x^3 + 0,00099x^4 \quad (6.20)$$

Os gráficos apresentados nas FIG. 6.106 a 6.112 demonstram o comportamento das seções de choque analisadas, assim como o comportamento do fator de multiplicação infinito.

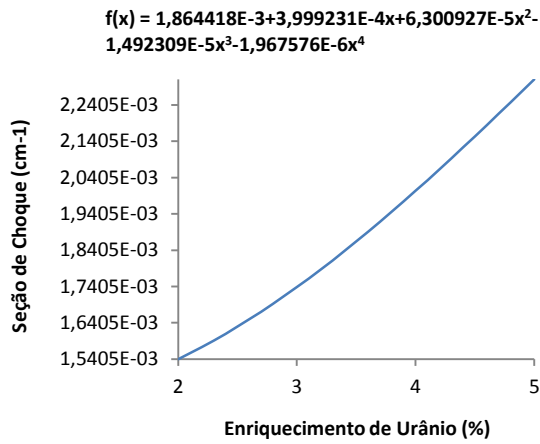


FIG. 6.106 Seção de choque de fissão do grupo rápido.

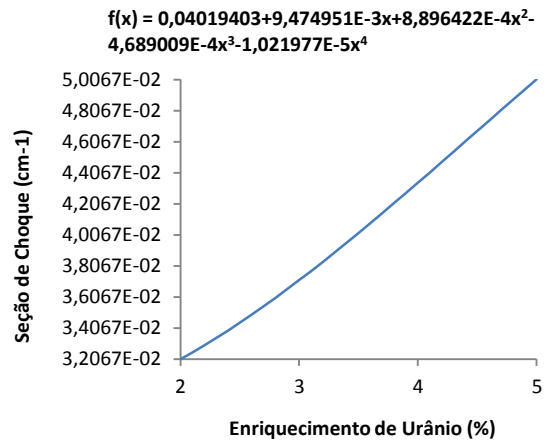


FIG. 6.107 Seção de choque de fissão do grupo térmico.

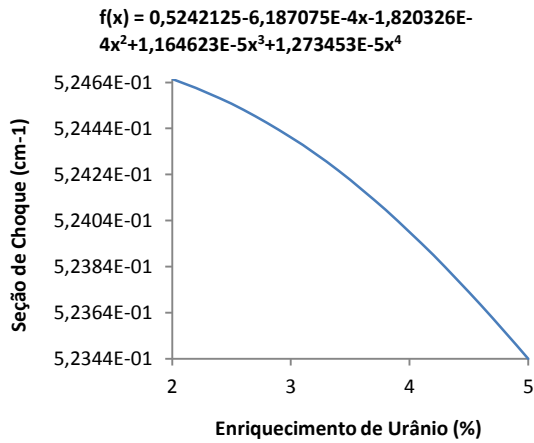


FIG. 6.108 Seção de choque de espalhamento do grupo rápido.

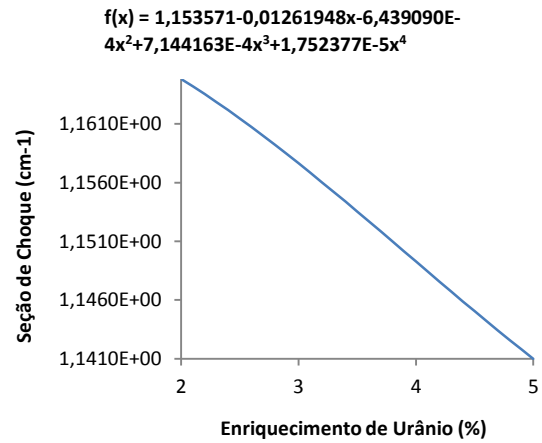


FIG. 6.109 Seção de choque de espalhamento do grupo térmico.

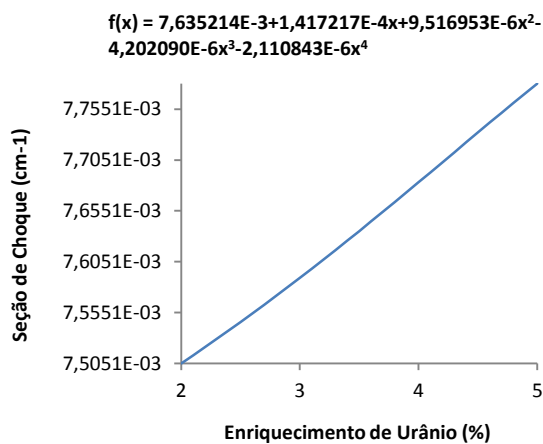


FIG. 6.110 Seção de choque de captura do grupo rápido.

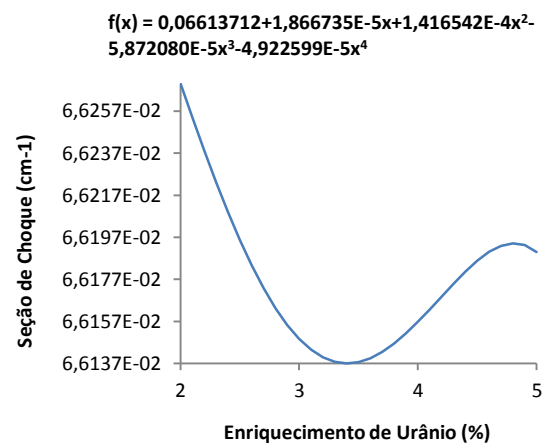
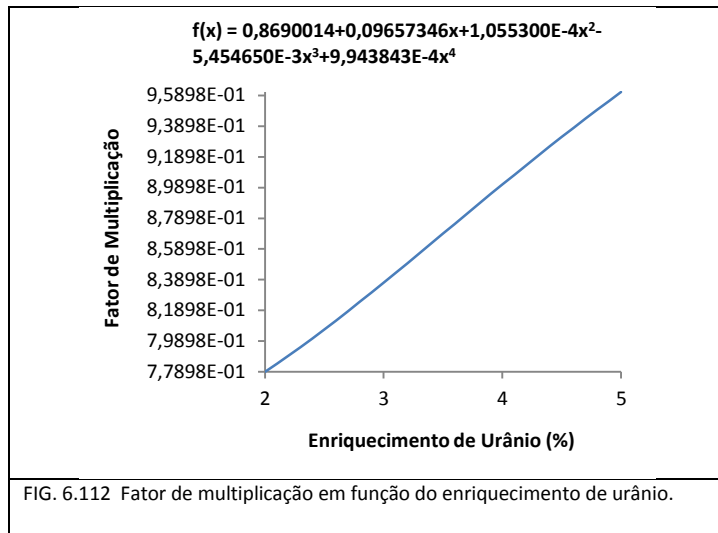


FIG. 6.111 Seção de choque de captura do grupo térmico.

O aumento do enriquecimento de urânio faz com que haja mais isótopos físeis, ou seja, mais isótopos de $^{235}_{92}\text{U}$ no combustível, aumentando assim a taxa de fissão.



Quanto mais fissões ocorrem dentro do reator, mais nêutrons serão gerados, aumentando a sua população.

7 CÁLCULO PARA O ELEMENTO COMBUSTÍVEL COM VENENO QUEIMÁVEL

7.1 INTRODUÇÃO

De forma análoga ao capítulo 6, este capítulo apresenta tabelas contendo as expansões polinomiais referentes às seções de choque macroscópicas parametrizadas, em função dos mesmos parâmetros analisados no capítulo anterior, para o elemento combustível com veneno queimável. As funções parametrizadas descritas nas tabelas deste capítulo formam escritas com os coeficientes contendo valores até cinco casas decimais, desprezando-se os coeficientes que apresentam valores menores do que 10^{-05} .

São conhecidos como venenos queimáveis materiais absorvedores de nêutrons, ou seja, materiais que possuem uma grande seção de choque de absorção, que são adicionados em um reator nuclear para controlar a reatividade do núcleo, obtendo um melhor desempenho do núcleo. Esses materiais podem ser utilizados tanto de forma homogênea, ou seja, misturado uniformemente ao refrigerante, como por exemplo, o ácido bórico enriquecido no isótopo $^{10}_5B$, ou de forma heterogênea, onde são posicionados em varetas alternadas ao combustível, dentro do elemento combustível. Os venenos queimáveis heterogêneos utilizam Terras Raras como sequestrante de nêutrons, como por exemplo, o $^{151}_{63}Eu$, $^{150}_{62}Sm$, $^{161}_{66}Dy$, sendo o mais comum em reatores PWR o $^{157}_{64}Gd$, na forma de óxido, Gd_2O_3 .

É também apresentada uma descrição gráfica do comportamento das seções de choque de fissão, espalhamento e captura, e para o comportamento do fator de multiplicação infinito, nas FIG. 7.1 a 7.112. Os demais gráficos do comportamento das seções de choque complementares estão disponíveis no apêndice 11.4 desta dissertação de mestrado.

Este capítulo foi dividido em subcapítulos que apresentam os ciclos de queima, mostrando em cada um uma tabela contendo a composição do combustível para cada ciclo.

7.2 CICLO ZERO

O ciclo zero representa o elemento combustível fresco, ou seja, sem a depleção do mesmo. A composição utilizada é composta pelas três misturas apresentadas no capítulo 5, seção 3, e os parâmetros estão apresentados na tabela 3.2, do capítulo 3.

7.2.1 PARAMETRIZAÇÃO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DO COMBUSTÍVEL

A parametrização a partir da variação da temperatura do combustível, mantendo os demais valores como valores de referência se deu da temperatura de 573 a 1473 K, conforme TAB. 3.1, do capítulo 3. A TAB. 7.1 apresenta as expansões polinomiais das seções de choque analisadas, referentes à variação da temperatura do combustível.

TAB. 7.1 Seções de choque em função da temperatura do combustível em um EC com veneno queimável para o reator fresco.

Seção de Choque	Grupo	Expansão Polinomial
Fissão	Rápido	00223
	Térmico	$0,03885 - 0,00016x$
Total	Rápido	$0,53549 + 0,00035x - 0,00002x^2 - 0,00003x^3 - 0,00001x^4$
	Térmico	$1,23591 - 0,00050x + 0,00001x^3 + 0,00001x^4$
Espalhamento Total	Rápido	$0,52608 + 0,00011x - 0,00001x^2 + 0,00001x^3$
	Térmico	$1,14498 - 0,00025x + 0,00002x^2 + 0,00002x^3 - 0,00001x^4$
Absorção	Rápido	$0,00945 + 0,00023x + 0,00002x^3 - 0,00001x^4$
	Térmico	$0,09093 - 0,00025x$
Captura	Rápido	$0,00722 + 0,00024x + 0,00002x^3 - 0,00001x^4$
	Térmico	$0,05208 - 0,00009x$
Nu-Fissão	Rápido	$0,00576 - 0,00001x$
	Térmico	$0,09467 - 0,00039x$
Transporte	Rápido	$0,21852 - 0,00006x - 0,00001x^2$
	Térmico	$0,74199 - 0,00031x - 0,00002x^2 - 0,00001x^3$
Espalhamento 1-1	–	$0,50711 + 0,00029x - 0,00001x^2 + 0,00003x^3 - 0,00001x^4$
Espalhamento 1-2	–	$0,01897 - 0,00018x - 0,00001x^3 + 0,00001x^4$
Espalhamento 2-2	–	$1,14498 - 0,00025x + 0,00002x^2 + 0,00002x^3 - 0,00001x^4$

O aumento na taxa de absorção é explicado devido a um aumento na captura

ressonante do $^{238}_{92}\text{U}$ com o efeito Doppler e com um correspondente decréscimo na autoblindagem, e por consequência um aumento da ressonância de absorção. O alargamento da ressonância de absorção faz com que ocorra uma diminuição no número de fissões no combustível nuclear.

A parametrização do fator de multiplicação infinito é dada pela função abaixo:

$$k_{\infty} = 1,01353 - 0,01114x + 0,00169x^2 - 0,00017x^3 - 0,00120x^4 \quad (7.1)$$

Para uma visualização mais clara do comportamento das seções de choque macroscópicas homogeneizadas e do fator de multiplicação infinito em função da variação da temperatura do combustível, gráficos foram disponibilizados de forma individualizada. Os valores dos coeficientes das expansões polinomiais apresentadas foram escritos sem limites de casas decimais.

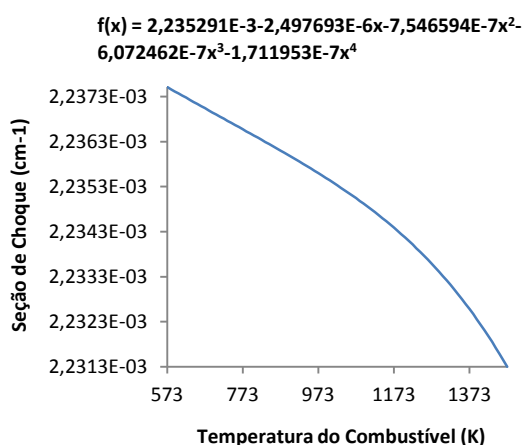


FIG. 7.1 Seção de choque de fissão do grupo rápido.

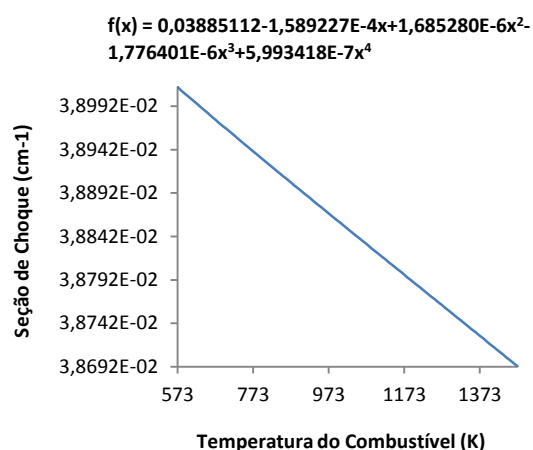


FIG. 7.2 Seção de choque de fissão do grupo térmico.

Os gráficos apresentados nas FIG. 7.1 e 7.2 demonstram o comportamento da seção de choque de fissão para o grupo rápido e para o grupo térmico de energia, respectivamente. A seção de choque para o grupo rápido é pouco sensível às variações da temperatura do combustível, mantendo-se praticamente com os valores constantes. Já a seção de choque referente ao grupo térmico diminui com o aumento da temperatura do combustível. Esses comportamentos, tanto para o grupo rápido como para o grupo térmico estão de acordo com o esperado, já que a presença do absorvedor de nêutrons juntamente com o efeito Doppler favorecem o aumento da

seção de choque de absorção e o decréscimo do número de fissões.

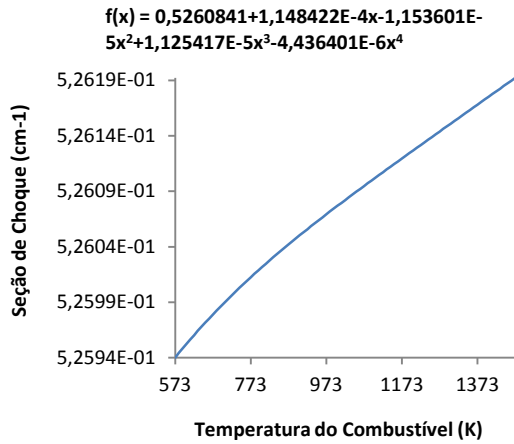


FIG. 7.3 Seção de choque de espalhamento do grupo rápido.

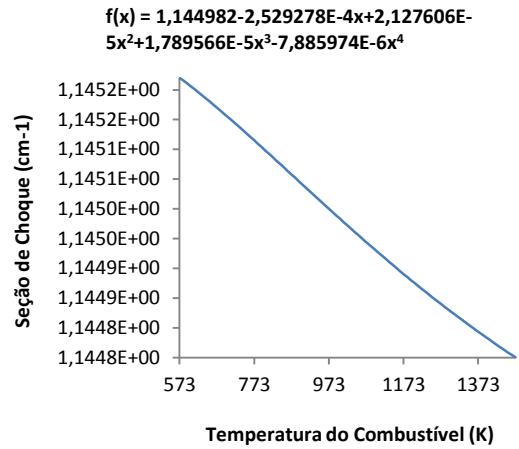


FIG. 7.4 Seção de choque de espalhamento do grupo térmico.

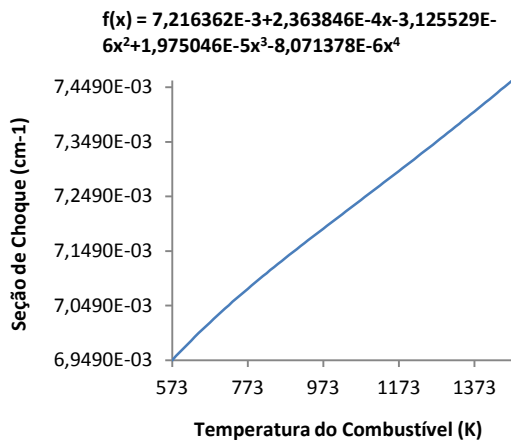


FIG. 7.5 Seção de choque de captura do grupo rápido.

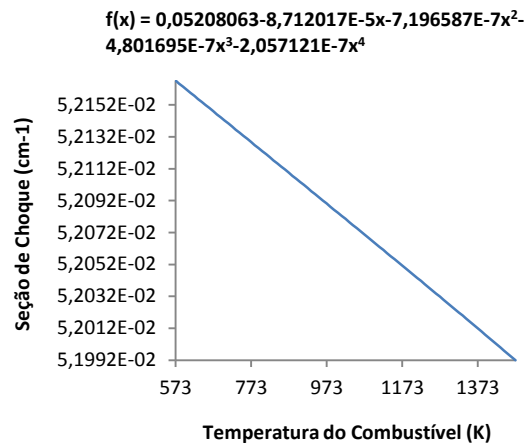


FIG. 7.6 Seção de choque de captura do grupo térmico.

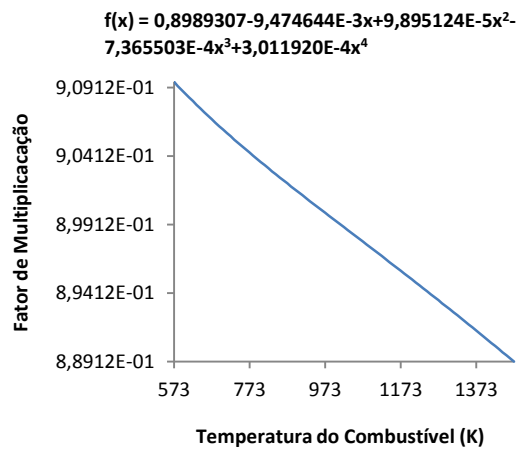


FIG. 7.7 Fator de multiplicação em função da temperatura do combustível.

A diminuição da taxa de fissão e a diminuição na taxa de captura levam a um decréscimo no fator de multiplicação de nêutrons, conforme apresentado na FIG. 7.7.

7.2.2 PARAMETRIZAÇÃO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA E DENSIDADE DO MODERADOR

As funções parametrizadas das seções de choque, com variação na temperatura e, conseqüentemente, densidade do moderador são descritas na TAB. 7.2. O argumento x provém da normalização apresentada na EQ. 3.10. A temperatura do moderador varia de 300 a 613 K.

TAB. 7.2 Seções de choque em função da temperatura e densidade do moderador em um EC com veneno queimável para o reator fresco.

Seção de Choque	Grupo	Expansão Polinomial
Fissão	Rápido	$0,00229 - 0,00004x - 0,00002x^3 - 0,00003x^4$
	Térmico	$0,04249 - 0,00444x + 0,00036x^2 - 0,00047x^3 - 0,00089x^4$
Total	Rápido	$0,61675 - 0,07756x - 0,01125x^2 - 0,01646x^3 - 0,02779x^4$
	Térmico	$1,53173 - 0,30849x - 0,02253x^2 - 0,04992x^3 - 0,08647x^4$
Espalhamento Total	Rápido	$0,60706 - 0,07730x - 0,01121x^2 - 0,01636x^3 - 0,02764x^4$
	Térmico	$1,42636 - 0,28177x - 0,02285x^2 - 0,04804x^3 - 0,08281x^4$
Absorção	Rápido	$0,00973 - 0,00026x - 0,00002x^2 - 0,00010x^3 - 0,00016x^4$
	Térmico	$0,10538 - 0,01671x + 0,00029x^2 - 0,00189x^3 - 0,00365x^4$
Captura	Rápido	$0,00745 - 0,00022x - 0,00002x^2 - 0,00008x^3 - 0,00013x^4$
	Térmico	$0,06289 - 0,01227x - 0,00006x^2 - 0,00142x^3 - 0,00276x^4$
Nu-Fissão	Rápido	$0,00590 - 0,00012x - 0,00001x^2 - 0,00005x^3 - 0,00008x^4$
	Térmico	$0,10353 - 0,01083x + 0,00087x^2 - 0,00114x^3 - 0,00217x^4$
Transporte	Rápido	$0,23797 - 0,01856x - 0,00272x^2 - 0,00391x^3 - 0,00660x^4$
	Térmico	$0,89734 - 0,15646x - 0,01756x^2 - 0,02679x^3 - 0,04720x^4$
Espalhamento 1-1	–	$0,58315 - 0,07258x - 0,01052x^2 - 0,01539x^3 - 0,02599x^4$
Espalhamento 1-2	–	$0,02392 - 0,00471x - 0,00069x^2 - 0,00097x^3 - 0,00165x^4$
Espalhamento 2-2	–	$1,42636 - 0,28177x - 0,02285x^2 - 0,04804x^3 - 0,08281x^4$

Conforme o comportamento da seção de choque de absorção, frente ao aumento da temperatura do combustível, como explicado no item anterior, 7.2.1, o aumento da temperatura do moderador juntamente com a presença das varetas absorvedoras de $Gd_2O_3 - UO_2$, conduz a um aumento na taxa de absorção e, por conseqüência, ocorre

uma diminuição no número de fissões no combustível nuclear. Pode-se observar, também, que embora o comportamento da seção de choque de absorção seja similar ao ocorrido na análise do elemento combustível sem veneno queimável, o valor da seção de choque é bem superior ao anterior. Isto se explica devido à presença do veneno queimável.

A função parametrizada do fator de multiplicação infinito, em função da temperatura do moderador, é dada pela função abaixo:

$$k_{\infty} = 0,87486 + 0,02597x + 0,00606x^2 + 0,00188x^3 + 0,00341x^4 \quad (7.2)$$

Os gráficos referentes ao comportamento das seções de choque selecionadas, assim como do fator de multiplicação infinito, encontram-se nas FIG. 6.8 a 6.14.

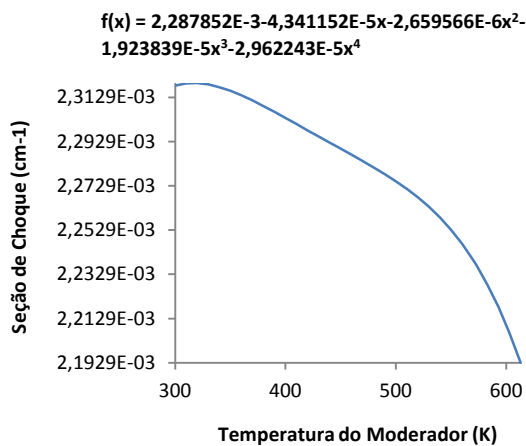


FIG. 7.8 Seção de choque de fissão do grupo rápido.

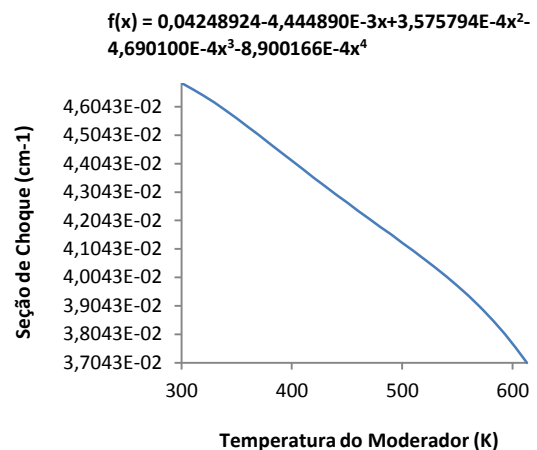


FIG. 7.9 Seção de choque de fissão do grupo térmico.

A seção de choque se comporta de maneira análoga ao item anterior, sendo pouco sensível para o grupo rápido de energia, mantendo-se praticamente com valores constantes, mas diminuindo para o grupo rápido de energia.

O espalhamento, tanto na faixa rápida e térmica de energia, diminui devido à diminuição da densidade do moderador e pelo aumento da taxa de absorção com o aumento da temperatura do mesmo.

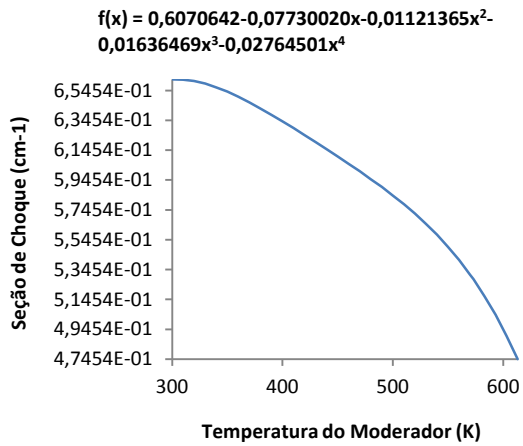


FIG. 7.10 Seção de choque de espalhamento do grupo rápido.

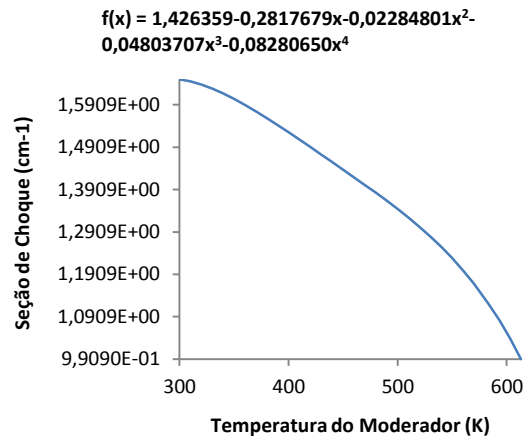


FIG. 7.11 Seção de choque de espalhamento do grupo térmico.

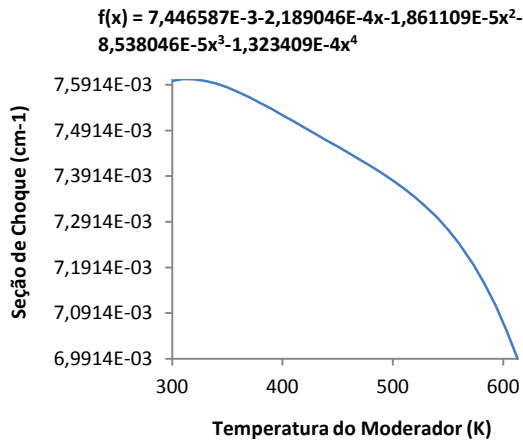


FIG. 7.12 Seção de choque de captura do grupo rápido.

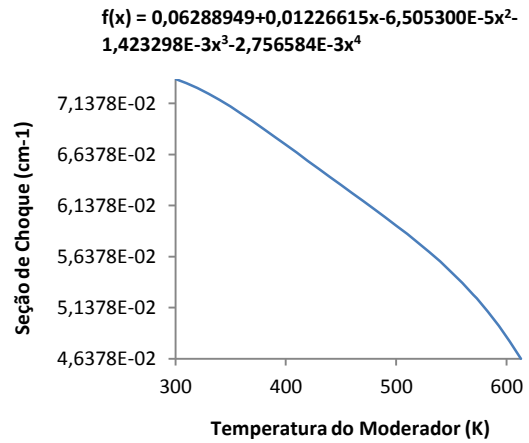


FIG. 7.13 Seção de choque de captura do grupo térmico.

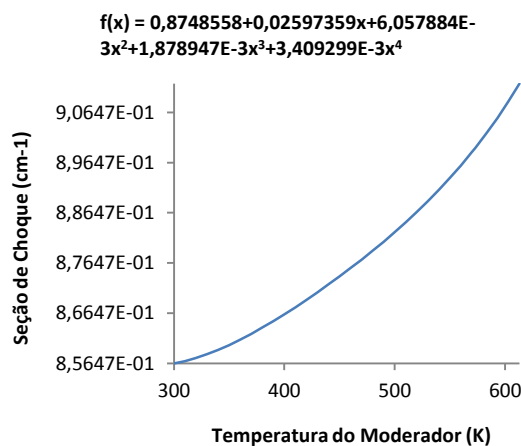


FIG. 7.14 Fator de multiplicação em função da temperatura do moderador.

A seção de choque de captura, para ambos os grupos, acompanhou o mesmo comportamento da seção de choque de absorção.

O aumento da criticalidade, e correspondente aumento do fator de multiplicação ocorrem devido à diminuição da densidade do moderador. Como no moderador há boro solúvel, que é um sequestrador de nêutrons, diminuindo a densidade do moderador, diminui a concentração de boro solúvel por volume de moderador, aumentando assim a população de nêutrons.

7.2.3 PARAMETRIZAÇÃO EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE BORO SOLÚVEL

De forma análoga ao capítulo anterior, devido à elevada seção de choque de captura de nêutrons, exibida no ácido bórico, pela presença do $^{10}_5B$, . Isto causa um aumento na absorção de nêutrons e por consequência uma diminuição do número de fissões.

As expansões polinomiais das seções de choque macroscópicas, em função da concentração de boro, estão descritas na TAB. 7.3.

TAB. 7.3 Seções de choque em função da concentração de boro solúvel em um EC com veneno queimável para o reator fresco.

Seção de Choque	Grupo	Expansão Polinomial
Fissão	Rápido	0,00223
	Térmico	$0,03816 - 0,00208x + 0,00016x^2 - 0,00001x^3$
Total	Rápido	$0,53543 - 0,00007x$
	Térmico	$1,23149 - 0,01290x + 0,00153x^2 - 0,00013x^3 + 0,00003x^4$
Espalhamento Total	Rápido	$0,52598 - 0,00027x$
	Térmico	$1,13651 - 0,02481x + 0,00202x^2 - 0,00017x^3 + 0,00003x^4$
Absorção	Rápido	$0,00949 + 0,00020x$
	Térmico	$0,09498 + 0,01191x - 0,00049x^2 + 0,00004x^3$
Captura	Rápido	$0,00726 + 0,00021x$
	Térmico	$0,05683 + 0,01399x - 0,00065x^2 + 0,00005x^3$
Nu-Fissão	Rápido	$0,00576 - 0,00001x$
	Térmico	$0,09298 - 0,00507x + 0,00039x^2 - 0,00003x^3$
Transporte	Rápido	$0,21852 - 0,00003x$
	Térmico	$0,73781 - 0,01203x + 0,00181x^2 - 0,00020x^3 + 0,00002x^4$
Espalhamento 1-1	–	$0,50704 - 0,00010x$
Espalhamento 1-2	–	$0,01894 - 0,00017x$
Espalhamento 2-2	–	$1,13651 - 0,02481x + 0,00202x^2 - 0,00017x^3 + 0,00003x^4$

A EQ. 7.3 representa o comportamento do fator de multiplicação infinito, conforme:

$$k_{\infty} = 0,85583 - 0,12462x + 0,02215x^2 - 0,00406x^3 + 0,00065x^4 \quad (7.3)$$

As FIG. 7.15 a 7.21 descrevem o comportamento das seções de choque e fator de multiplicação analisados, frente à variação da concentração de boro solúvel.

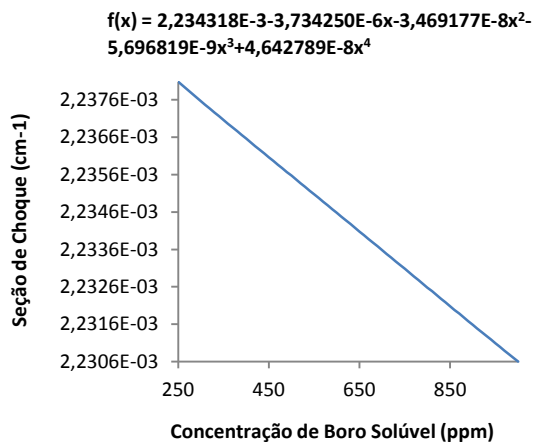


FIG. 7.15 Seção de choque de fissão do grupo rápido.

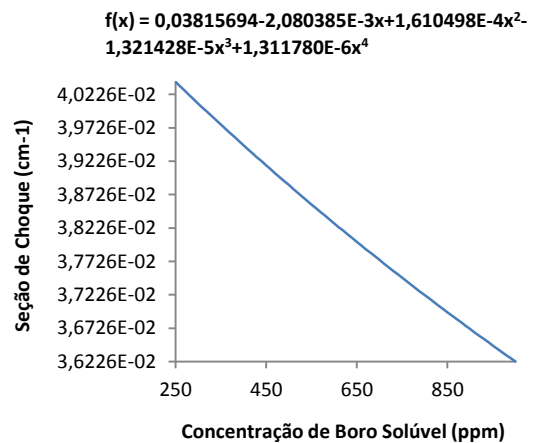


FIG. 7.16 Seção de choque de fissão do grupo térmico.

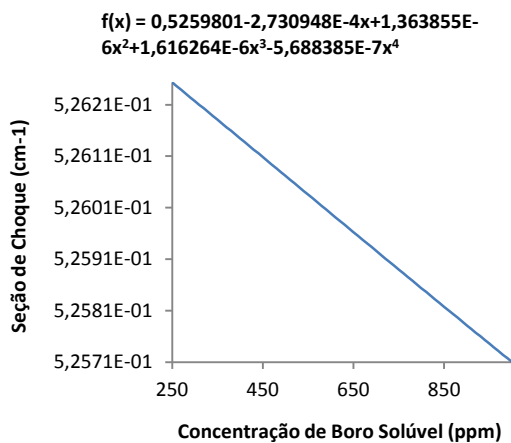


FIG. 7.17 Seção de choque de espalhamento do grupo rápido.

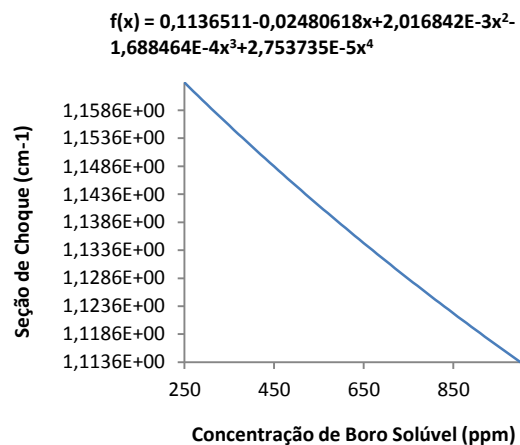


FIG. 7.18 Seção de choque de espalhamento do grupo térmico.

Análogo à seção de choque de absorção, há um aumento na taxa de captura de nêutrons.

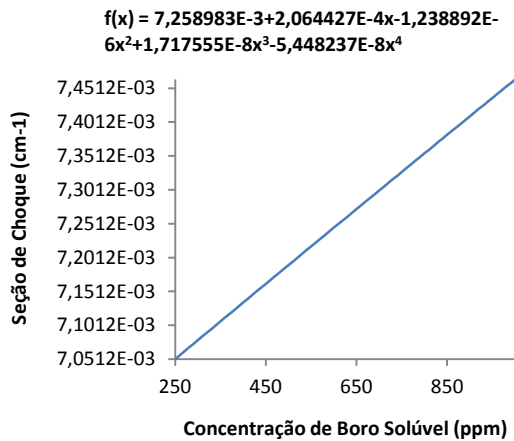


FIG. 7.19 Seção de choque de captura do grupo rápido.

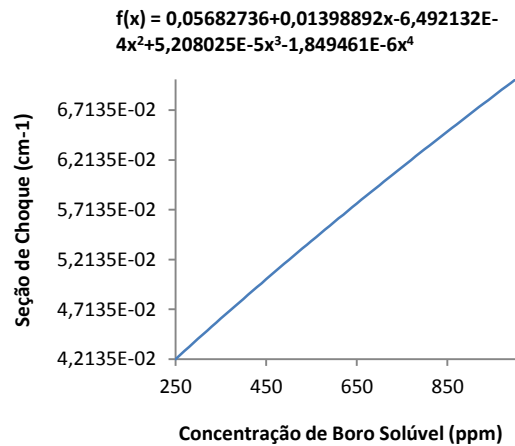


FIG. 7.20 Seção de choque de captura do grupo térmico.

A diminuição da população de nêutrons é explicada pelo aumento da concentração do sequestrante natural de nêutrons, o $^{10}_5B$.

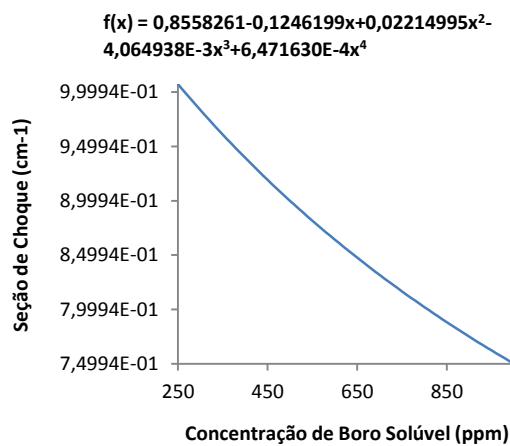


FIG. 7.21 Fator de multiplicação em função da concentração de boro solúvel.

7.2.4 PARAMETRIZAÇÃO EM FUNÇÃO DO ENRIQUECIMENTO DE $^{235}_{92}U$

A tabela 7.4 apresenta as funções parametrizadas das seções de choque macroscópicas, em função da concentração de $^{235}_{92}U$. Foi considerado o intervalo de 2 a 5 % de enriquecimento, o mesmo intervalo de valor utilizado nos diferentes elementos combustíveis presentes em ANGRA II.

TAB. 7.4 Seções de choque em função da concentração do enriquecimento de urânio em um EC com veneno queimável para o reator fresco.

Seção de Choque	Grupo	Expansão Polinomial
Fissão	Rápido	$0,00245 + 0,00062x - 0,00002x^2$
	Térmico	$0,04359 + 0,01367x - 0,00138x^2 + 0,00020x^3 - 0,00004x^4$
Total	Rápido	$0,53517 - 0,00085x$
	Térmico	$1,23495 - 0,00250x + 0,00157x^2 - 0,00029x^3 + 0,00008x^4$
Espalhamento Total	Rápido	$0,52552 - 0,00164x + 0,00004x^2$
	Térmico	$1,13911 - 0,01667x + 0,00290x^2 - 0,00049x^3 + 0,00011x^4$
Absorção	Rápido	$0,00969 + 0,00079x - 0,00003x^2$
	Térmico	$0,09584 + 0,01417x - 0,00132x^2 + 0,00019x^3 - 0,00003x^4$
Captura	Rápido	$0,00725 + 0,00016x - 0,00001x^2$
	Térmico	$0,05225 + 0,00050x + 0,00005x^2 - 0,00001x^3$
Nu-Fissão	Rápido	$0,00628 + 0,00153x - 0,00005x^2$
	Térmico	$0,10621 + 0,03331x - 0,00336x^2 + 0,00049x^3 - 0,00009x^4$
Transporte	Rápido	$0,21837 - 0,00048x + 0,00001x^2$
	Térmico	$0,73795 - 0,01124x + 0,00280x^2 - 0,00056x^3 + 0,00012x^4$
Espalhamento 1-1	–	$0,50673 - 0,00105x + 0,00001x^2$
Espalhamento 1-2	–	$0,01879 - 0,00059x + 0,00003x^2$
Espalhamento 2-2	–	$1,13911 - 0,01667x + 0,00290x^2 - 0,00049x^3 + 0,00011x^4$

As funções descritas a partir da variação do enriquecimento do urânio revelam um aumento um aumento na taxa de absorção, tanto na faixa rápida como na faixa térmica de energia, visto que há um aumento nas taxas de captura e de fissão, mesmo com a presença das varetas absorvedoras.

A parametrização do fator de multiplicação infinito, em função do enriquecimento do $^{235}_{92}\text{U}$ é dada pela função abaixo:

$$k_{\infty} = 0,95289 + 0,14548x - 0,03583x^2 + 0,01046x^3 - 0,00340x^4 \quad (7.4)$$

Os gráficos apresentados nas FIG. 7.22 a 7.27 demonstram o comportamento das seções de choque analisadas, assim como o comportamento do fator de multiplicação infinito.

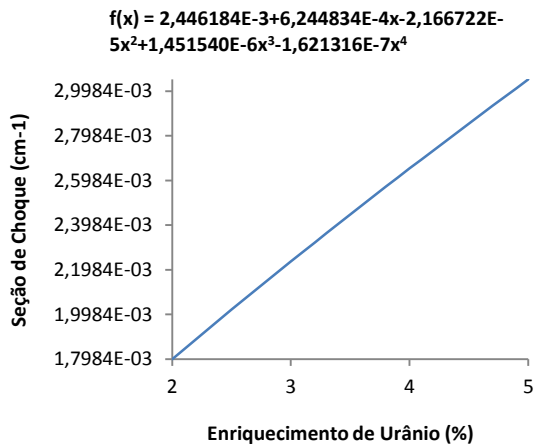


FIG. 7.22 Seção de choque de fissão do grupo rápido.

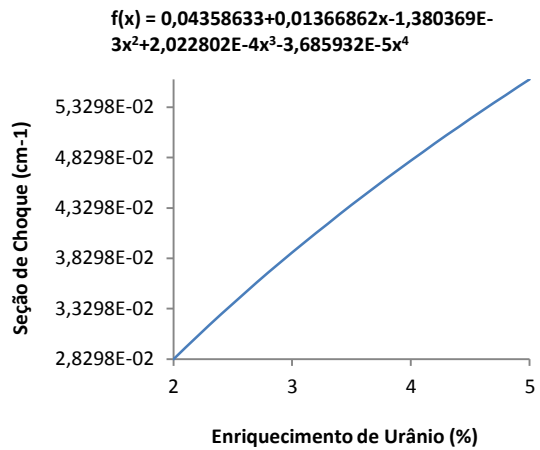


FIG. 7.23 Seção de choque de fissão do grupo térmico.

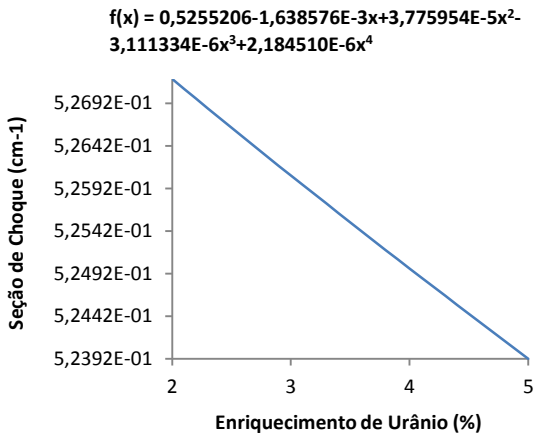


FIG. 7.24 Seção de choque de espalhamento do grupo rápido.

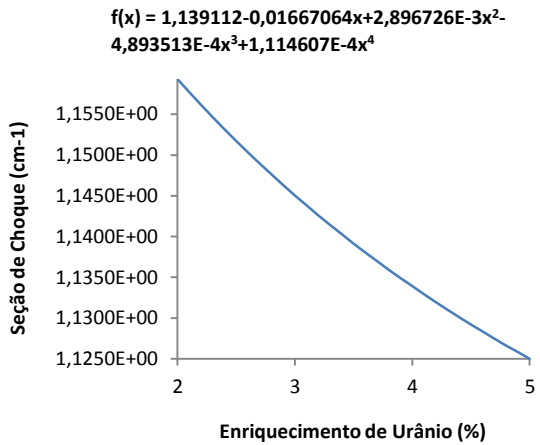


FIG. 7.25 Seção de choque de espalhamento do grupo térmico.

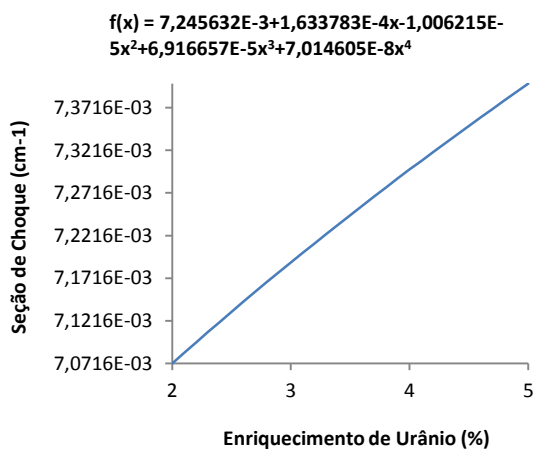


FIG. 7.26 Seção de choque de captura do grupo rápido.

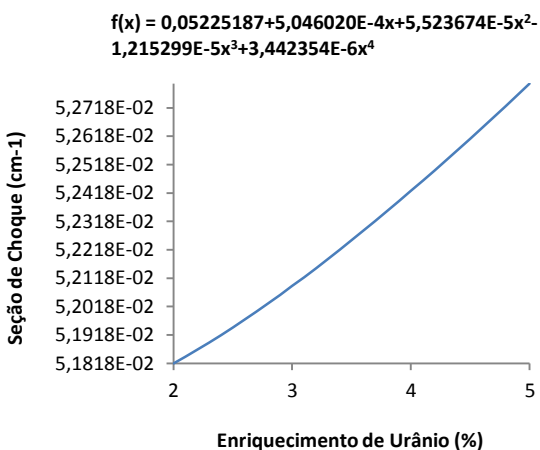


FIG. 7.27 Seção de choque de captura do grupo térmico.

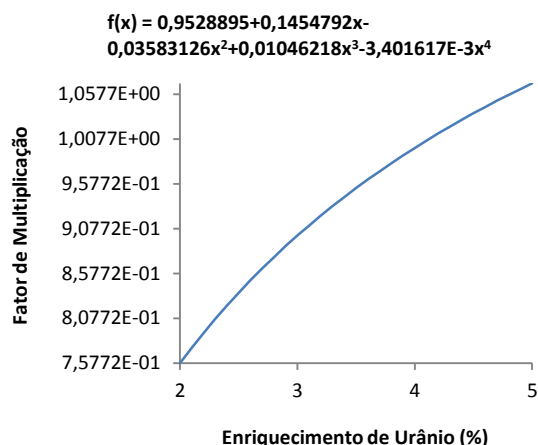


FIG. 7.28 Fator de multiplicação em função do enriquecimento de urânio.

O aumento do enriquecimento de urânio faz com que haja mais isótopos físeis, ou seja, mais isótopos de $^{235}_{92}\text{U}$ no combustível, aumentando assim a taxa de fissão.

Observa-se que o comportamento das seções de choque de espalhamento representadas nas FIG. 7.24 e 7.25, apresentaram um decréscimo com o aumento do enriquecimento, explicado pelo aumento da taxa de absorção causado pela presença das varetas de $Gd_2O_3 - UO_2$ a qual diminui a taxa das reações de espalhamento.

Quanto mais fissões ocorrem dentro do reator, mais nêutrons serão gerados, aumentando a sua população.

7.3 CICLO 1

A composição apresentada na TAB. 7.5 é resultante da depleção do combustível do reator fresco. Ela contém os fragmentos de fissão e os actínidos, em função do enriquecimento do $^{235}_{92}\text{U}$, em valores de *number density*.

Nota-se que de um ciclo para o outro, a concentração de elemento físsil, no caso o $^{235}_{92}\text{U}$ vai diminuindo, conforme a concentração dos produtos de fissão e actínidos vão aumentando.

TAB. 7.5 Composições isotópicas dos núclídeos no primeiro ciclo de queima em um EC com veneno queimável.

Nuclídeo	Number Density (atom/b-cm) x Enriquecimento de Urânio (%)				
	2 %	2,5 %	3 %	4 %	5 %
$^{234}_{92}\text{U}$	6,9520E-08	7,3910E-08	7,7960E-08	8,5280E-08	9,1880E-08
$^{235}_{92}\text{U}$	2,4720E-04	3,3530E-04	4,2880E-04	6,2610E-04	8,3160E-04
$^{236}_{92}\text{U}$	3,6840E-05	4,1830E-05	4,5930E-05	5,2360E-05	5,7240E-05
$^{238}_{92}\text{U}$	2,2560E-02	2,2480E-02	2,2390E-02	2,2190E-02	2,1990E-02
$^{238}_{94}\text{Pu}$	4,0040E-07	3,5910E-07	3,2490E-07	2,7260E-07	2,3460E-07
$^{239}_{94}\text{Pu}$	1,0820E-04	1,0730E-04	1,0630E-04	1,0380E-04	1,0090E-04
$^{240}_{94}\text{Pu}$	2,5510E-05	2,2290E-05	1,9660E-05	1,5740E-05	1,3000E-05
$^{241}_{94}\text{Pu}$	1,2930E-05	1,1170E-05	9,7530E-06	7,5820E-06	6,0310E-06
$^{242}_{94}\text{Pu}$	1,9080E-06	1,3940E-06	1,0440E-06	6,2550E-07	4,0210E-07
$^{243}_{94}\text{Pu}$	6,9830E-10	4,7680E-10	3,3810E-10	1,8370E-10	1,0830E-10
$^{241}_{95}\text{Am}$	1,5640E-07	1,3410E-07	1,1600E-07	8,8850E-08	6,9900E-08
$^{242}_{95}\text{Am}^*$	1,8060E-09	1,5130E-09	1,2810E-09	9,3860E-10	7,0020E-10
$^{243}_{95}\text{Am}$	1,8460E-07	1,2290E-07	8,5110E-08	4,4700E-08	2,5790E-08
$^{242}_{96}\text{Cm}$	2,8870E-08	2,1580E-08	1,6560E-08	1,0360E-08	6,8990E-09
$^{243}_{96}\text{Cm}$	2,5910E-10	1,7580E-10	1,2420E-10	6,7900E-11	4,0460E-11
$^{244}_{96}\text{Cm}$	2,2620E-08	1,3570E-08	8,6150E-09	3,9250E-09	2,0170E-09
$^{245}_{96}\text{Cm}$	6,5040E-10	3,6500E-10	2,1820E-10	9,0100E-11	4,2580E-11
$^{95}_{42}\text{Mo}$	9,7150E-06	9,9450E-06	1,0120E-05	1,0350E-05	1,0510E-05
$^{99}_{43}\text{Tc}$	1,6880E-05	1,7050E-05	1,7180E-05	1,7370E-05	1,7510E-05
$^{101}_{44}\text{Ru}$	1,5480E-05	1,5450E-05	1,5430E-05	1,5400E-05	1,5390E-05
$^{103}_{45}\text{Rh}$	8,8960E-06	8,6140E-06	8,4060E-06	8,1300E-06	7,9640E-06
$^{109}_{47}\text{Ag}$	1,3340E-06	1,1370E-06	9,8700E-07	7,7680E-07	6,4030E-07
$^{133}_{55}\text{Cs}$	1,7610E-05	1,7780E-05	1,7920E-05	1,8120E-05	1,8270E-05
$^{143}_{60}\text{Nd}$	1,2490E-05	1,3010E-05	1,3430E-05	1,4040E-05	1,4460E-05
$^{145}_{60}\text{Nd}$	9,7790E-06	1,0030E-05	1,0220E-05	1,0500E-05	1,0680E-05
$^{147}_{62}\text{Sm}$	4,6640E-07	4,8390E-07	4,9800E-07	5,1950E-07	5,3520E-07
$^{149}_{62}\text{Sm}$	6,6870E-08	7,5670E-08	8,5430E-08	1,0820E-07	1,3320E-07
$^{150}_{62}\text{Sm}$	3,6250E-06	3,5740E-06	3,5280E-06	3,4480E-06	3,3760E-06
$^{151}_{62}\text{Sm}$	2,7420E-07	3,0050E-07	3,2970E-07	3,9110E-07	4,5080E-07
$^{152}_{62}\text{Sm}$	1,7780E-06	1,7280E-06	1,6820E-06	1,6040E-06	1,5400E-06
$^{153}_{63}\text{Eu}$	1,2180E-06	1,1370E-06	1,0730E-06	9,7570E-07	9,0510E-07
$^{155}_{64}\text{Gd}$	1,3500E-08	2,0770E-08	1,0430E-07	1,5870E-06	4,3700E-06
$^{16}_{8}\text{O}$	4,6770E-02	4,6770E-02	4,6770E-02	4,6780E-02	4,6780E-02

7.3.1 PARAMETRIZAÇÃO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DO COMBUSTÍVEL

A composição apresentada na TAB. 7.5 serviu como *input* no módulo T-NEWT para o processamento das seções de choque, em função das variáveis selecionadas. Utilizando o intervalo de temperatura do combustível de 573 a 1473 K, assim como as seções de choque respectivas, podem-se gerar as funções parametrizadas descritas na TAB. 7.6, abaixo.

TAB. 7.6 Seções de choque em função da temperatura do combustível em um EC com veneno queimável no primeiro ciclo de queima.

Seção de Choque	Grupo	Expansão Polinomial
Fissão	Rápido	0,00200
	Térmico	$0,03946 - 0,00001x$
Total	Rápido	$0,53646 + 0,00034x - 0,00001x^2 + 0,00003x^3 - 0,00001x^4$
	Térmico	$1,25352 - 0,00015x + 0,00001x^3 - 0,00001x^4$
Espalhamento Total	Rápido	$0,52708 + 0,00012x - 0,00001x^4$
	Térmico	$1,14846 - 0,00032x - 0,00001x^2 + 0,00002x^3 + 0,00001x^4$
Absorção	Rápido	$0,00943 + 0,00023x + 0,00002x^3 - 0,00001x^4$
	Térmico	$0,10506 + 0,00015x - 0,00002x^2$
Captura	Rápido	$0,00743 + 0,00023x + 0,00002x^3 - 0,00001x^4$
	Térmico	$0,06561 + 0,00016x - 0,00002x^2 + 0,00001x^3$
Nu-Fissão	Rápido	$0,00532 - 0,00001x$
	Térmico	$0,10344 + 0,00001x$
Transporte	Rápido	$0,21794 - 0,00006x - 0,00001x^2$
	Térmico	$0,75393 + 0,00005x - 0,00004x^2 + 0,00001x^3$
Espalhamento 1-1	–	$0,50815 + 0,00029x - 0,00001x^2 + 0,00002x^3 - 0,00001x^4$
Espalhamento 1-2	–	$0,01893 - 0,00018x - 0,00001x^3 + 0,00001x^4$
Espalhamento 2-2	–	$1,14846 - 0,00032x - 0,00001x^2 + 0,00002x^3 + 0,00001x^4$

A seção de choque de fissão apresenta um comportamento similar quando comparado ao ciclo anterior, sendo para o grupo rápido, muito pouco sensível com o aumento da temperatura, mantendo-se com valores constantes, mas diminuindo para o grupo térmico.

A função resultante da expansão dos coeficientes de Tchebyshev, considerando as seções de choque em função da temperatura do combustível, é descrita na EQ. 7.5, abaixo:

$$k_{\infty} = 0,84619 - 0,00890x + 0,00022x^2 - 0,00074x^3 + 0,00030x^4 \quad (7.5)$$

Segue, abaixo, os gráficos apresentados nas FIG. 7.29 a 7.35, do comportamento das seções de choque e fator de multiplicação infinito em função da variação da temperatura do combustível.

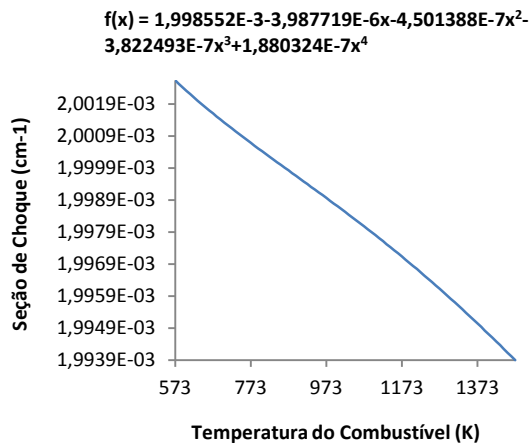


FIG. 7.29 Seção de choque de fissão do grupo rápido.

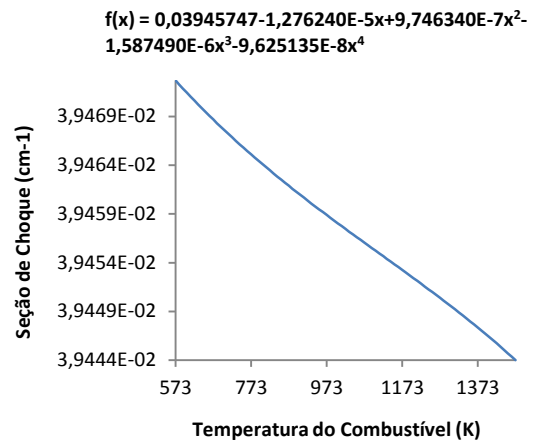


FIG. 7.30 Seção de choque de fissão do grupo térmico.

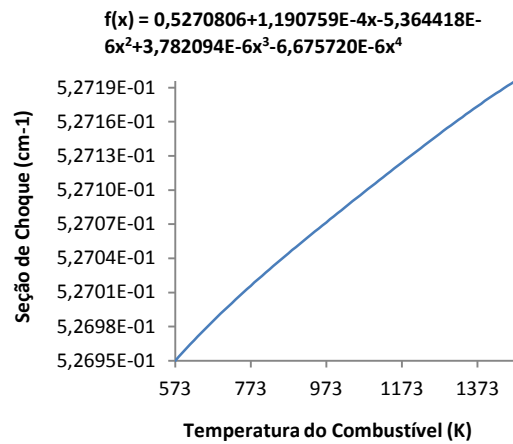


FIG. 7.31 Seção de choque de espalhamento do grupo rápido.

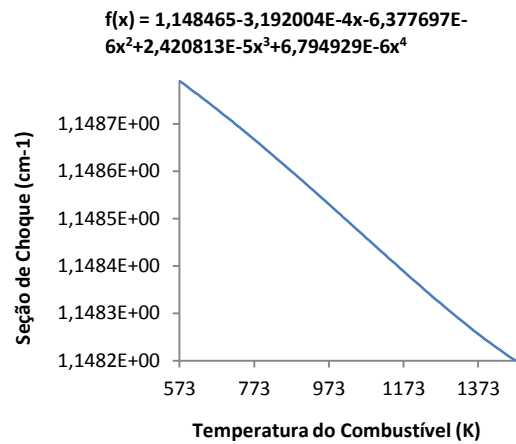


FIG. 7.32 Seção de choque de espalhamento do grupo térmico.

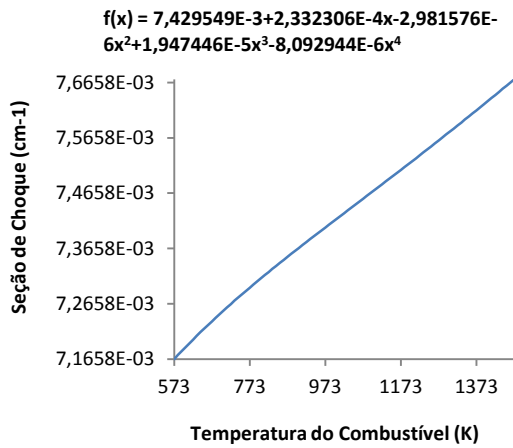


FIG. 7.33 Seção de choque de captura do grupo rápido.

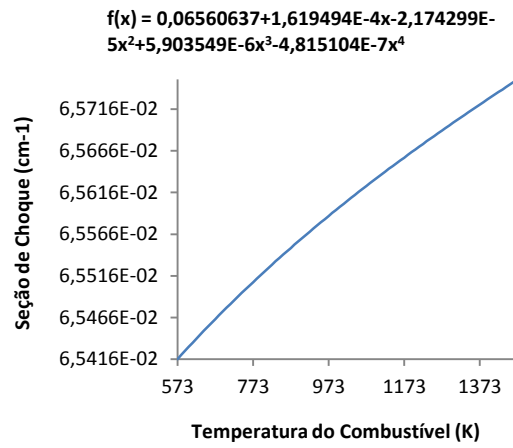


FIG. 7.34 Seção de choque de captura do grupo térmico.

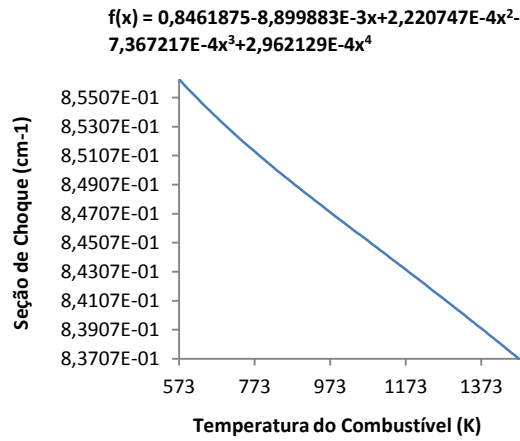


FIG. 7.35 Fator de multiplicação em função da temperatura do combustível.

7.3.2 PARAMETRIZAÇÃO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA E DENSIDADE DO MODERADOR

A parametrização a partir da variação da temperatura do moderador e suas respectivas densidades estão apresentadas na TAB. 7.7. A variação da temperatura do moderador se deu da temperatura de 300 a 613 K, mantendo as demais variáveis com valores de referência, apresentados na tabela 3.2 do capítulo 3.

TAB. 7.7 Seções de choque em função da temperatura e densidade do moderador em um EC com veneno queimável no primeiro ciclo de queima.

Seção de Choque	Grupo	Expansão Polinomial
Fissão	Rápido	$0,00205 - 0,00004x - 0,00002x^3 - 0,00003x^4$
	Térmico	$0,04169 - 0,00266x + 0,00053x^2 - 0,00063x^3 - 0,00095x^4$
Total	Rápido	$0,61554 - 0,07737x - 0,01119x^2 - 0,01646x^3 - 0,02778x^4$
	Térmico	$1,54379 - 0,30951x - 0,02233x^2 - 0,05041x^3 - 0,08691x^4$
Espalhamento Total	Rápido	$0,60589 - 0,07711x - 0,01117x^2 - 0,01634x^3 - 0,02762x^4$
	Térmico	$1,42625 - 0,29492x - 0,02302x^2 - 0,04829x^3 - 0,08316x^4$
Absorção	Rápido	$0,00971 - 0,00026x - 0,00002x^2 - 0,00011x^3 - 0,00017x^4$
	Térmico	$0,11754 - 0,01459x + 0,00070x^2 - 0,00212x^3 - 0,00375x^4$
Captura	Rápido	$0,00766 - 0,00022x - 0,00002x^2 - 0,00009x^3 - 0,00014x^4$
	Térmico	$0,07585 - 0,01193x - 0,00016x^2 - 0,00150x^3 - 0,00280x^4$
Nu-Fissão	Rápido	$0,00546 - 0,00012x - 0,00001x^2 - 0,00005x^3 - 0,00008x^4$
	Térmico	$0,10880 - 0,00634x + 0,00143x^2 - 0,00166x^3 - 0,00246x^4$
Transporte	Rápido	$0,23678 - 0,01842x - 0,00269x^2 - 0,00390x^3 - 0,00658x^4$
	Térmico	$0,90828 - 0,15990x - 0,01722x^2 - 0,02702x^3 - 0,04767x^4$
Espalhamento 1-1	–	$0,58216 - 0,07243x - 0,01048x^2 - 0,01537x^3 - 0,02597x^4$
Espalhamento 1-2	–	$0,02373 - 0,00469x - 0,00069x^2 - 0,00097x^3 - 0,00164x^4$
Espalhamento 2-2	–	$1,42625 - 0,29492x - 0,02302x^2 - 0,04829x^3 - 0,08316x^4$

Pode-se observar que a presença das varetas com veneno reduz a quantidade de nêutrons fazendo com que reduza o número de fissões. Observa-se também que com a diminuição da quantidade de átomos do moderado por volume, resultante do aumento da temperatura do moderador, reduz também a capacidade de moderação, e por consequência menos nêutrons são termalizados. Isso faz com que o número de fissões induzidas diminua.

A expansão polinomial do fator de multiplicação infinito, em função da densidade e temperatura do moderador é dada pela função abaixo:

$$k_{\infty} = 0,82123 + 0,03183x + 0,00691x^2 - 0,00264x^3 - 0,00161x^4 \quad (7.6)$$

Da FIG. 7.36 a 7.42 são mostrados o comportamento das seções de choque e fator de multiplicação infinito, frente à variação da temperatura e, conseqüentemente, densidade do moderador.

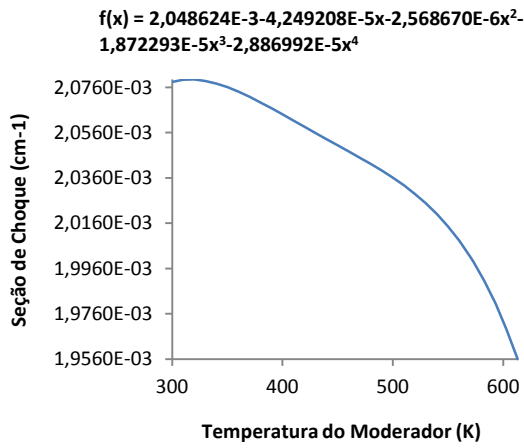


FIG. 7.36 Seção de choque de fissão do grupo rápido.

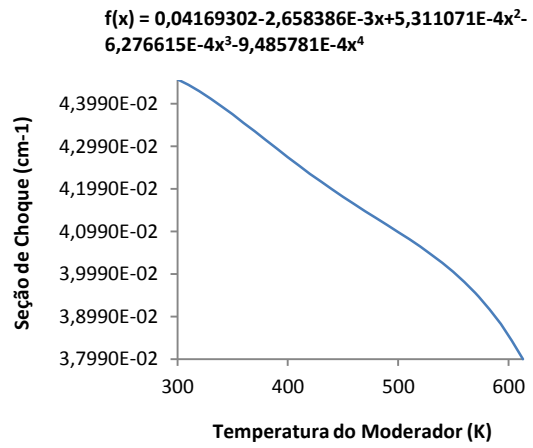


FIG. 7.37 Seção de choque de fissão do grupo térmico.

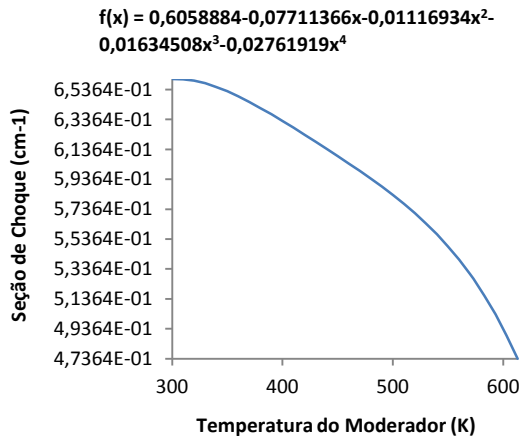


FIG. 7.38 Seção de choque de espalhamento do grupo rápido.

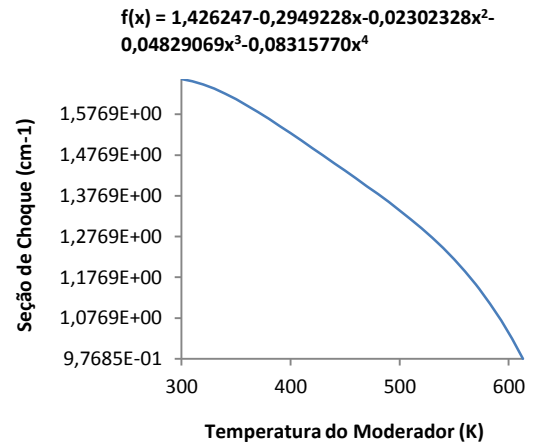


FIG. 7.39 Seção de choque de espalhamento do grupo térmico.

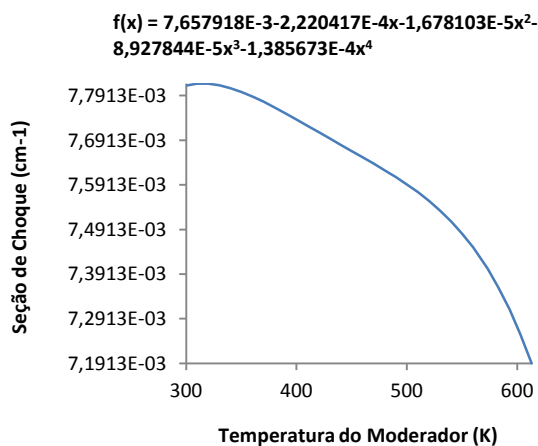


FIG. 7.40 Seção de choque de captura do grupo rápido.

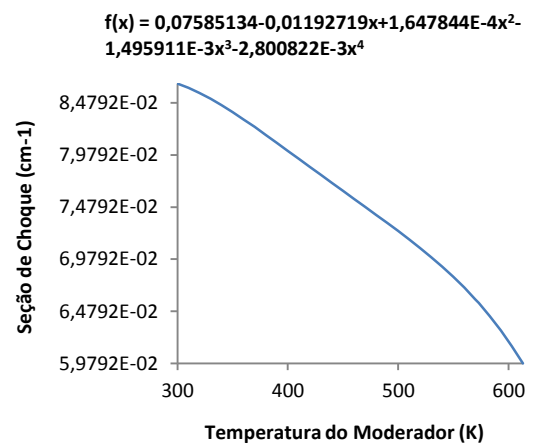


FIG. 7.41 Seção de choque de captura do grupo térmico.

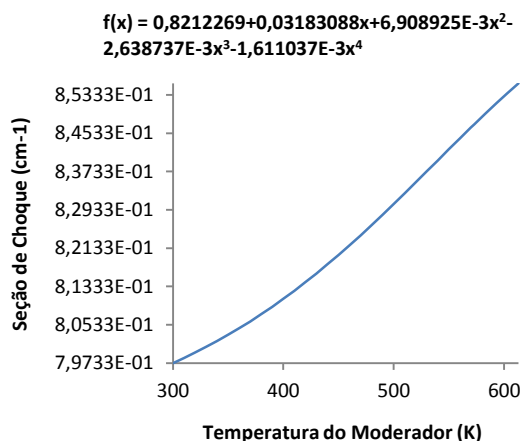


FIG. 7.42 Fator de multiplicação em função da temperatura do moderador.

7.3.3 PARAMETRIZAÇÃO EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE BORO SOLÚVEL

As expansões polinomiais das seções de choque macroscópicas, em função da concentração de boro, estão descritas na TAB. 7.8.

TAB. 7.8 Seções de choque em função da concentração de boro solúvel em um EC com veneno queimável no primeiro ciclo de queima.

Seção de Choque	Grupo	Expansão Polinomial
Fissão	Rápido	0,00200
	Térmico	$0,03889 - 0,00168x + 0,00012x^2 - 0,00001x^3$
Total	Rápido	$0,53640 - 0,00007x$
	Térmico	$1,24943 - 0,01182x + 0,00145x^2 - 0,00013x^3 + 0,00004x^4$
Espalhamento Total	Rápido	$0,52697 - 0,00027x + 0,00002x^2 - 0,00001x^4$
	Térmico	$1,14013 - 0,02440x + 0,00209x^2 - 0,00016x^3 - 0,00004x^4$
Absorção	Rápido	$0,00947 + 0,00020x$
	Térmico	$0,10929 + 0,01256x - 0,00054x^2 + 0,00005x^3 - 0,00001x^4$
Captura	Rápido	$0,00747 + 0,00020x$
	Térmico	$0,07041 + 0,01423x - 0,00066x^2 + 0,00006x^3 - 0,00001x^4$
Nu-Fissão	Rápido	$0,00532 - 0,00001x$
	Térmico	$0,10198 - 0,00427x + 0,00030x^2 - 0,00002x^3$
Transporte	Rápido	$0,21794 - 0,00002x$
	Térmico	$0,74989 - 0,01151x + 0,00177x^2 - 0,00019x^3$
Espalhamento 1-1	–	$0,50808 - 0,00010x + 0,00002x^2 - 0,00001x^4$
Espalhamento 1-2	–	$0,01890 - 0,00017x$
Espalhamento 2-2	–	$1,14013 - 0,02440x + 0,00209x^2 - 0,00016x^3 - 0,00004x^4$

A elevada seção de choque de absorção do $^{10}_5B$, juntamente com a presença das varetas absorvedoras faz com que haja um aumento na taxa de absorção de nêutrons, e altera o fator de multiplicação infinito, ou seja, diminui a taxa de fissão.

A EQ. 7.7 descreve o comportamento do fator de multiplicação infinito obtido através da variação da concentração de boro solúvel, conforme:

$$k_{\infty} = 0,81036 - 0,10438x + 0,01723x^2 - 0,00301x^3 + 0,00046x^4 \quad (7.7)$$

As FIG. 7.43 a 7.49 descrevem o comportamento das seções de choque e fator de multiplicação analisados, frente à variação da concentração de boro solúvel.

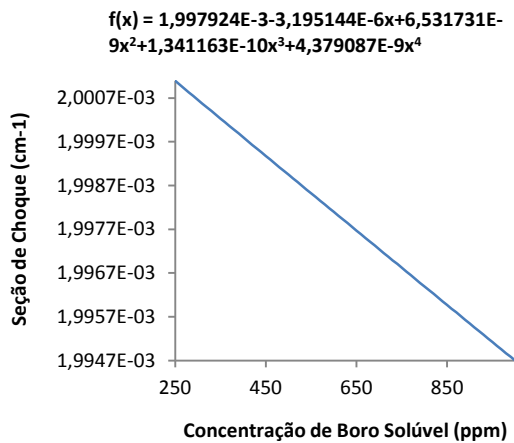


FIG. 7.43 Seção de choque de fissão do grupo rápido.

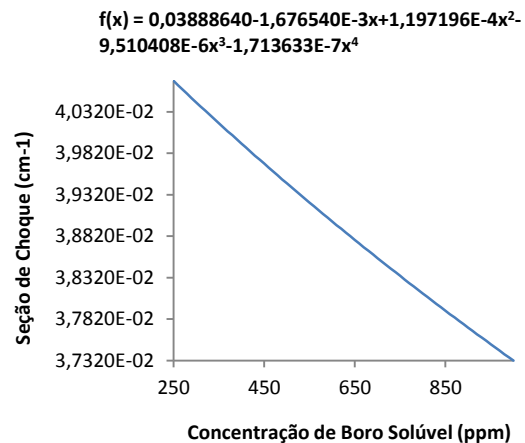


FIG. 7.44 Seção de choque de fissão do grupo térmico.

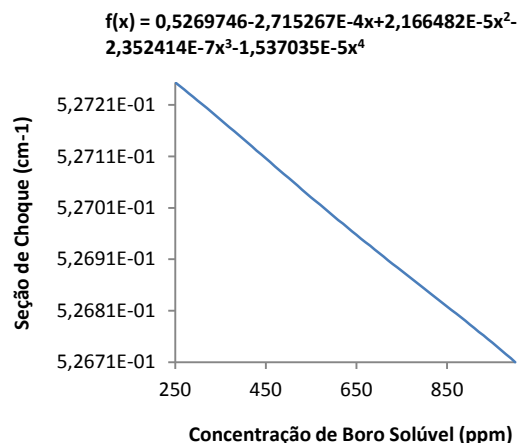


FIG. 7.45 Seção de choque de espalhamento do grupo rápido.

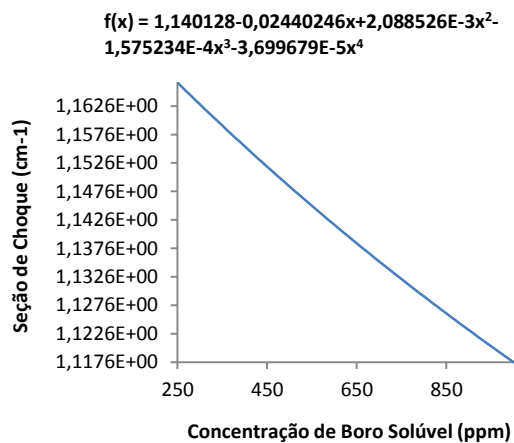


FIG. 7.46 Seção de choque de espalhamento do grupo térmico.

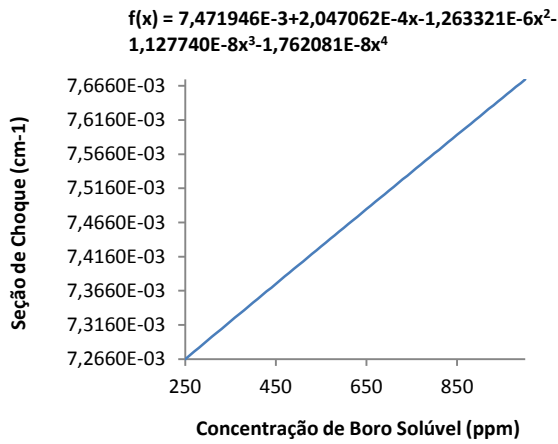


FIG. 7.47 Seção de choque de captura do grupo rápido.

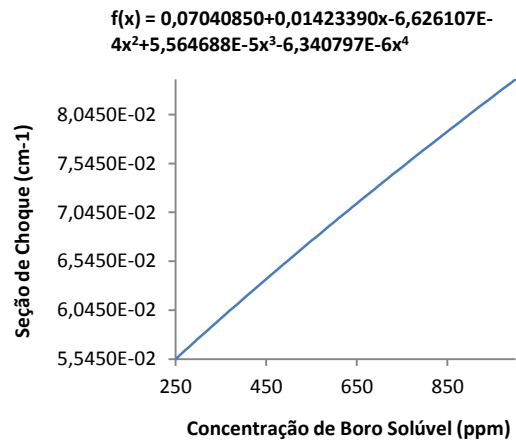


FIG. 7.48 Seção de choque de captura do grupo térmico.

Análogo à seção de choque de absorção, há um aumento na taxa de captura de nêutrons.

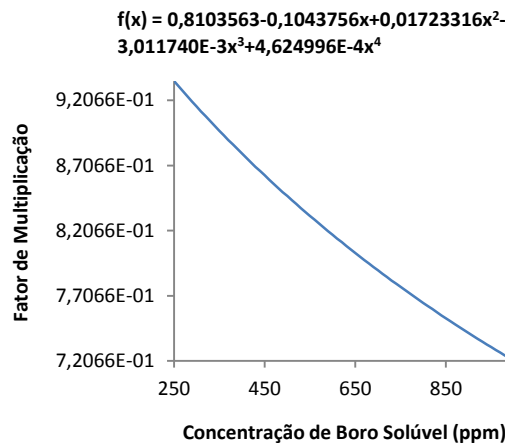


FIG. 7.49 Fator de multiplicação em função da concentração de boro solúvel.

A diminuição da população de nêutrons é explicada pelo aumento da concentração do sequestrante natural de nêutrons, o $^{10}_5B$.

7.3.4 PARAMETRIZAÇÃO EM FUNÇÃO DO ENRIQUECIMENTO DE $^{235}_{92}U$

As expansões polinomiais das seções de choque macroscópicas, em função da concentração de $^{235}_{92}U$, estão representadas na TAB. 7.9.

TAB. 7.9 Seções de choque em função da concentração do enriquecimento de urânio em um EC com veneno queimável no primeiro ciclo de queima.

Seção de Choque	Grupo	Expansão Polinomial
Fissão	Rápido	$0,00217 + 0,00052x + 0,00001x^2 - 0,00001x^3$
	Térmico	$0,04282 + 0,00941x - 0,00212x^2 - 0,00008x^3 + 0,00068x^4$
Total	Rápido	$0,53634 - 0,00032x - 0,00016x^2 + 0,00007x^3$
	Térmico	$1,25176 - 0,00559x - 0,00063x^2 + 0,00075x^3 + 0,00093x^4$
Espalhamento Total	Rápido	$0,52676 - 0,00099x - 0,00015x^2 + 0,00007x^3 - 0,00002x^4$
	Térmico	$1,14251 - 0,01929x - 0,00362x^2 + 0,00177x^3 + 0,00235x^4$
Absorção	Rápido	$0,00963 + 0,00067x + 0,00001x^2 - 0,00001x^3$
	Térmico	$0,10926 + 0,01369x + 0,00293x^2 - 0,00100x^3 - 0,00136x^4$
Captura	Rápido	$0,00745 + 0,00016x$
	Térmico	$0,06644 + 0,00427x + 0,00505x^2 - 0,00091x^3 - 0,00204x^4$
Nu-Fissão	Rápido	$0,00573 + 0,00125x + 0,00002x^2 - 0,00002x^3 + 0,00001x^4$
	Térmico	$0,11132 + 0,02201x - 0,00520x^2 - 0,00018x^3 + 0,00171x^4$
Transporte	Rápido	$0,21794 - 0,00008x - 0,00013x^2 + 0,00006x^3$
	Térmico	$0,74884 - 0,01631x - 0,00284x^2 + 0,00156x^3 + 0,00220x^4$
Espalhamento 1-1	–	$0,50796 - 0,00050x - 0,00014x^2 + 0,00006x^3 - 0,00002x^4$
Espalhamento 1-2	–	$0,01879 - 0,00048x - 0,00001x^2 + 0,00001x^3$
Espalhamento 2-2	–	$1,14251 - 0,01929x - 0,00362x^2 + 0,00177x^3 + 0,00235x^4$

As funções descritas a partir da variação do enriquecimento do urânio revelam um aumento um aumento na taxa de absorção, tanto na faixa rápida como na faixa térmica de energia, visto que há um aumento nas taxas de captura e de fissão.

A parametrização do fator de multiplicação infinito, em função do enriquecimento do $^{235}_{92}\text{U}$ é dada pela função abaixo:

$$k_{\infty} = 0,87713 + 0,07002x - 0,05884x^2 + 0,00891x^3 + 0,02041x^4 \quad (7.8)$$

Os gráficos apresentados nas FIG. 7.50 a 7.56 demonstram o comportamento das seções de choque analisadas, assim como o comportamento do fator de multiplicação infinito.

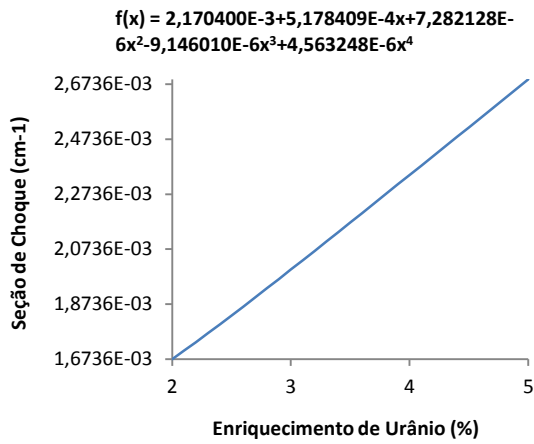


FIG. 7.50 Seção de choque de fissão do grupo rápido.

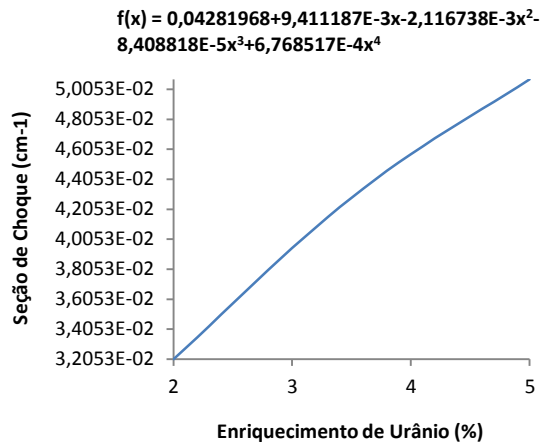


FIG. 7.51 Seção de choque de fissão do grupo térmico.

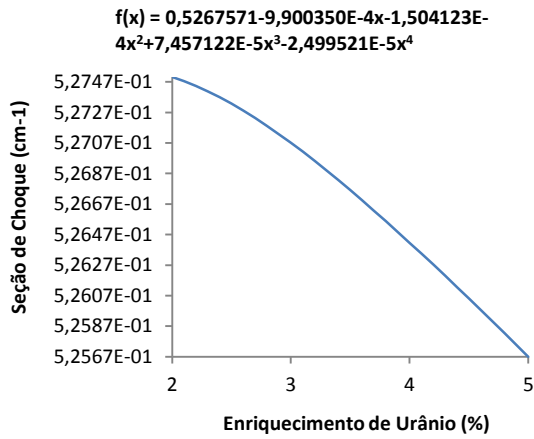


FIG. 7.52 Seção de choque de espalhamento do grupo rápido.

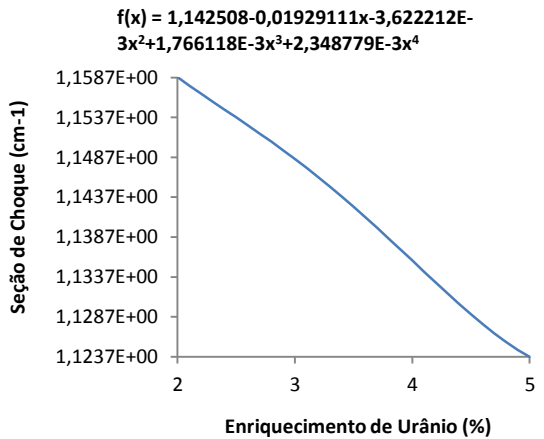


FIG. 7.53 Seção de choque de espalhamento do grupo térmico.

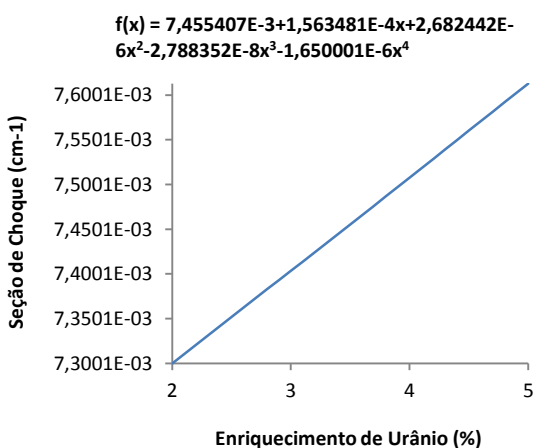


FIG. 7.54 Seção de choque de captura do grupo rápido.

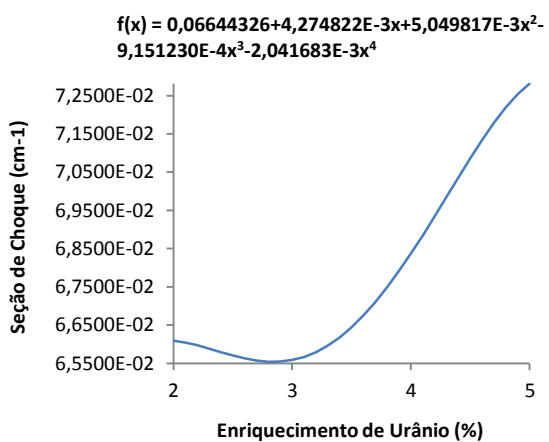


FIG. 7.55 Seção de choque de captura do grupo térmico.

O aumento do enriquecimento de urânio faz com que haja mais isótopos físeis, ou seja, mais isótopos de $^{235}_{92}\text{U}$ no combustível, aumentando assim a taxa de fissão.

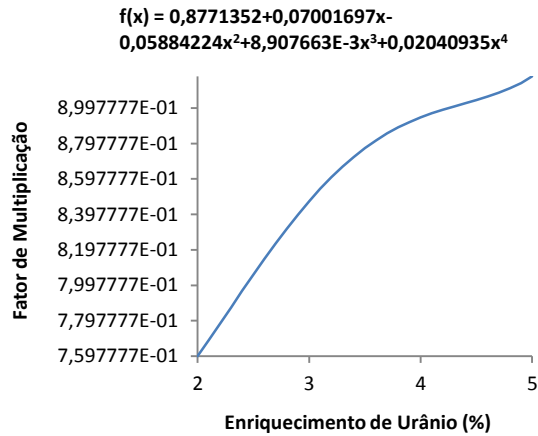


FIG. 7.56 Fator de multiplicação em função do enriquecimento de urânio.

Quanto mais fissões ocorrem dentro do reator, mais nêutrons serão gerados, aumentando a sua população.

7.4 CICLO 2

A TAB. 7.10 apresenta os valores, em *number density*, da composição utilizada no segundo ciclo de queima. Essa nova composição provém da depleção da composição utilizada no combustível referente ao primeiro ciclo de queima. Nela consta os mesmos produtos de fissão e actinídeos, porém há uma variação da concentração dos mesmos.

TAB. 7.10 Composições isotópicas dos nuclídeos no segundo ciclo de queima em um EC com veneno queimável.

Nuclídeo	Number Density (atom/b-cm) x Enriquecimento de Urânio (%)				
	2 %	2,5 %	3 %	4 %	5 %
$^{234}_{92}\text{U}$	1,1810E-07	1,2580E-07	1,3320E-07	1,4720E-07	1,6000E-07
$^{235}_{92}\text{U}$	1,3700E-04	1,9490E-04	2,6090E-04	4,1110E-04	5,7820E-04
$^{236}_{92}\text{U}$	5,1270E-05	6,0860E-05	6,9290E-05	8,3300E-05	9,4440E-05
$^{238}_{92}\text{U}$	2,2370E-02	2,2310E-02	2,2240E-02	2,2080E-02	2,1910E-02
$^{238}_{94}\text{Pu}$	1,1380E-06	1,0840E-06	1,0220E-06	9,0340E-07	8,0320E-07
$^{239}_{94}\text{Pu}$	1,3380E-04	1,3610E-04	1,3830E-04	1,4170E-04	1,4380E-04
$^{240}_{94}\text{Pu}$	4,8180E-05	4,4720E-05	4,1470E-05	3,5810E-05	3,1250E-05
$^{241}_{94}\text{Pu}$	2,9130E-05	2,7390E-05	2,5740E-05	2,2630E-05	1,9880E-05
$^{242}_{94}\text{Pu}$	8,9200E-06	7,2980E-06	6,0030E-06	4,1590E-06	2,9800E-06
$^{243}_{94}\text{Pu}$	3,1700E-09	2,4920E-09	1,9750E-09	1,2740E-09	8,5220E-10
$^{241}_{95}\text{Am}$	6,2890E-07	5,9630E-07	5,6410E-07	5,0150E-07	4,4410E-07
$^{242}_{95}\text{Am}^*$	8,7690E-09	8,3510E-09	7,9420E-09	7,1180E-09	6,2820E-09
$^{243}_{95}\text{Am}$	1,7280E-06	1,3190E-06	1,0190E-06	6,3020E-07	4,1000E-07
$^{242}_{96}\text{Cm}$	2,0510E-07	1,7440E-07	1,4850E-07	1,0930E-07	8,2150E-08
$^{243}_{96}\text{Cm}$	3,7730E-09	2,9820E-09	2,3760E-09	1,5510E-09	1,0530E-09
$^{244}_{96}\text{Cm}$	4,7490E-07	3,2910E-07	2,3300E-07	1,2440E-07	7,1590E-08
$^{245}_{96}\text{Cm}$	2,5800E-08	1,7060E-08	1,1560E-08	5,7150E-09	3,0680E-09
$^{95}_{42}\text{Mo}$	1,7250E-05	1,7780E-05	1,8210E-05	1,8850E-05	1,9300E-05
$^{99}_{43}\text{Tc}$	3,0790E-05	3,1210E-05	3,1560E-05	3,2110E-05	3,2520E-05
$^{101}_{44}\text{Ru}$	2,9820E-05	2,9770E-05	2,9730E-05	2,9670E-05	2,9640E-05
$^{103}_{45}\text{Rh}$	1,6450E-05	1,6070E-05	1,5770E-05	1,5300E-05	1,4990E-05
$^{109}_{47}\text{Ag}$	3,1820E-06	2,8500E-06	2,5660E-06	2,1160E-06	1,7890E-06
$^{133}_{55}\text{Cs}$	3,1880E-05	3,2300E-05	3,2670E-05	3,3240E-05	3,3680E-05
$^{143}_{60}\text{Nd}$	2,0300E-05	2,1420E-05	2,2410E-05	2,4010E-05	2,5220E-05
$^{145}_{60}\text{Nd}$	1,7180E-05	1,7710E-05	1,8150E-05	1,8850E-05	1,9360E-05
$^{147}_{62}\text{Sm}$	7,6530E-07	7,9850E-07	8,2800E-07	8,7700E-07	9,1480E-07
$^{149}_{62}\text{Sm}$	6,8080E-08	7,4450E-08	8,1980E-08	1,0040E-07	1,2160E-07
$^{150}_{62}\text{Sm}$	6,7980E-06	6,7470E-06	6,6980E-06	6,6070E-06	6,5230E-06
$^{151}_{62}\text{Sm}$	3,5230E-07	3,7470E-07	4,0120E-07	4,6080E-07	5,2400E-07
$^{152}_{62}\text{Sm}$	2,9300E-06	2,9030E-06	2,8750E-06	2,8260E-06	2,7890E-06
$^{153}_{63}\text{Eu}$	3,0250E-06	2,8900E-06	2,7710E-06	2,5650E-06	2,3980E-06
$^{155}_{64}\text{Gd}$	1,5370E-08	2,4790E-08	8,9070E-08	1,0720E-06	3,3820E-06
$^{16}_{8}\text{O}$	4,7070E-02	4,7070E-02	4,7070E-02	4,7080E-02	4,7080E-02

7.4.1 PARAMETRIZAÇÃO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DO COMBUSTÍVEL

A partir da composição apresentada na TAB. 7.10, foi realizado o processamento das seções de choque, no módulo T-NEWT, em função das variáveis selecionadas.

A TAB. 7.11 descreve as expansões polinomiais em função da variação da temperatura do combustível.

TAB. 7.11 Seções de choque em função da temperatura do combustível em um EC com veneno queimável no segundo ciclo de queima.

Seção de Choque	Grupo	Expansão Polinomial
Fissão	Rápido	0,00182
	Térmico	0,03704 + 0,00005x
Total	Rápido	0,53643 + 0,00034x - 0,00001x ² + 0,00003x ³ - 0,00001x ⁴
	Térmico	1,26016 + 0,00007x - 0,00001x ² + 0,00003x ³ - 0,00001x ⁴
Espalhamento Total	Rápido	0,52706 + 0,00011x - 0,00001x ² + 0,00001x ³
	Térmico	1,15128 - 0,00031x + 0,00001x ² + 0,00002x ³
Absorção	Rápido	0,00942 + 0,00023x + 0,00002x ³ - 0,00001x ⁴
	Térmico	0,10888 + 0,00038x - 0,00002x ² + 0,00001x ³
Captura	Rápido	0,00760 + 0,00023x + 0,00002x ³ - 0,00001x ⁴
	Térmico	0,07185 + 0,00033x - 0,00002x ² + 0,00001x ³
Nu-Fissão	Rápido	0,00496 - 0,00001x
	Térmico	0,10047 + 0,00018x
Transporte	Rápido	0,21756 - 0,00006x - 0,00001x ²
	Térmico	0,76114 + 0,00017x - 0,00002x ² + 0,00002x ³
Espalhamento 1-1	-	0,50812 + 0,00029x - 0,00001x ² + 0,00002x ³ - 0,00001x ⁴
Espalhamento 1-2	-	0,01894 - 0,00018x - 0,00001x ³ + 0,00001x ⁴
Espalhamento 2-2	-	1,15128 - 0,00031x + 0,00001x ² + 0,00002x ³

A função resultante da expansão dos coeficientes de Tchebyshev, considerando as seções de choque em função da temperatura do combustível, é descrita na EQ. 7.9, abaixo:

$$k_{\infty} = 0,79247 - 0,00868x + 0,00021x^2 - 0,00072x^3 + 0,00028x^4 \quad (7.9)$$

Segue, abaixo, os gráficos apresentados nas FIG. 7.57 a 7.63, do comportamento das seções de choque e fator de multiplicação infinito em função da variação da temperatura do combustível.

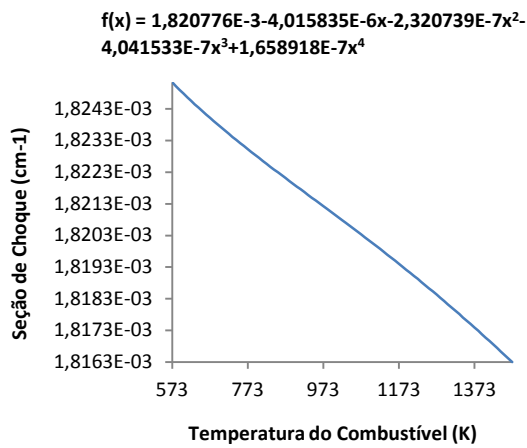


FIG. 7.57 Seção de choque de fissão do grupo rápido.

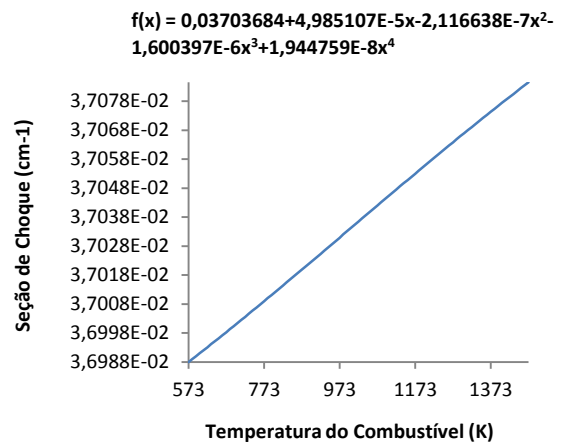


FIG. 7.58 Seção de choque de fissão do grupo térmico.

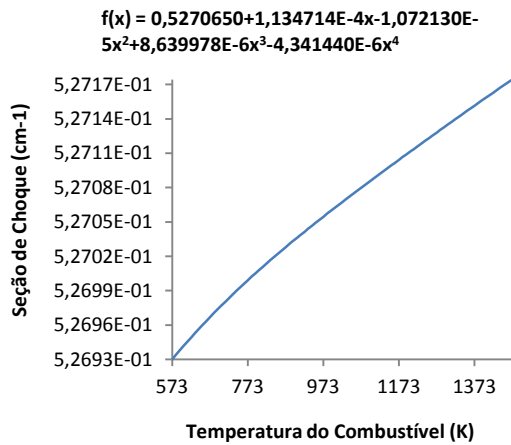


FIG. 7.59 Seção de choque de espalhamento do grupo rápido.

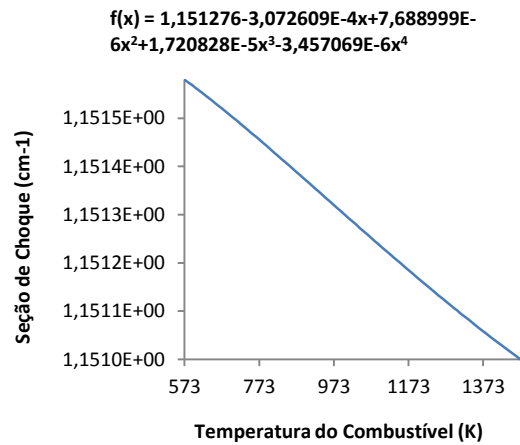


FIG. 7.60 Seção de choque de espalhamento do grupo térmico.

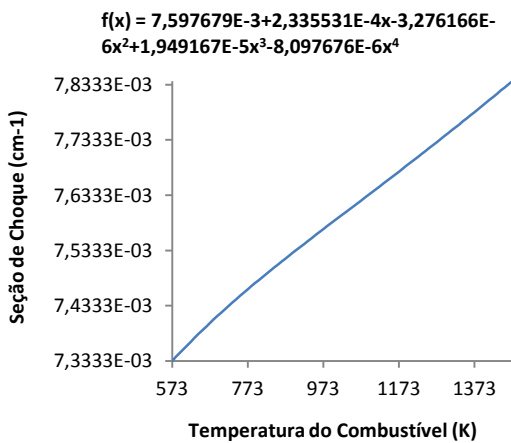


FIG. 7.61 Seção de choque de captura do grupo rápido.

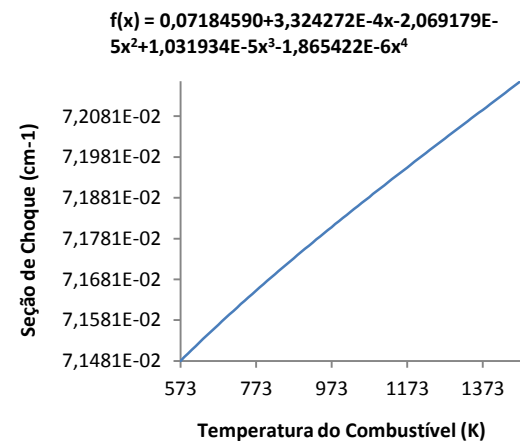


FIG. 7.62 Seção de choque de captura do grupo térmico.

Pode-se observar que a seção de choque de espalhamento rápido aumenta com o

aumento da temperatura do combustível, o que é fisicamente aceitável, visto que a elevação na temperatura faz com que se aumente a energia cinética das moléculas e com isso o número de colisões. Neste caso, embora o aumento da temperatura faça com que haja um acréscimo no valor da seção de choque de absorção devido ao efeito Doppler, a ressonância de absorção não perturba a forma de moderação do fluxo.

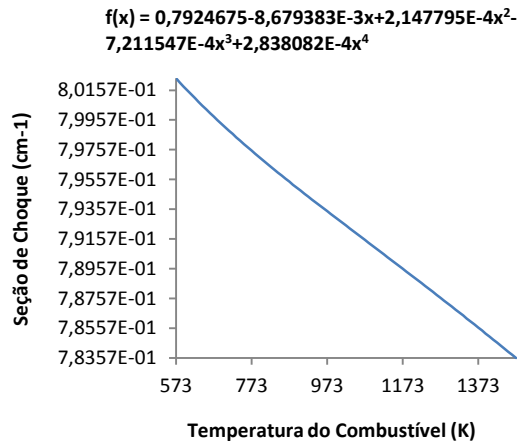


FIG. 7.63 Fator de multiplicação em função da temperatura do combustível.

7.4.2 PARAMETRIZAÇÃO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA E DENSIDADE DO MODERADOR

As funções resultantes da expansão dos coeficientes de Tchebyshev estão descritas na TAB.7.12. Para geração destas funções parametrizadas, geraram-se as seções de choque macroscópicas homogêneas variando a temperatura e a densidade do moderador, onde a temperatura variou de 300 a 613 K.

TAB. 7.12 Seções de choque em função da temperatura e densidade do moderador em um EC com veneno queimável no segundo ciclo de queima.

Seção de Choque	Grupo	Expansão Polinomial
Fissão	Rápido	$0,00187 - 0,00004x - 0,00002x^3 - 0,00003x^4$
	Térmico	$0,03855 - 0,00172x + 0,00054x^2 - 0,00065x^3 - 0,00089x^4$
Total	Rápido	$0,61530 - 0,07717x - 0,01119x^2 - 0,01639x^3 - 0,02766x^4$
	Térmico	$1,55118 - 0,31064x - 0,02196x^2 - 0,05065x^3 - 0,08704x^4$
Espalhamento Total	Rápido	$0,60565 - 0,07690x - 0,01117x^2 - 0,01628x^3 - 0,02749x^4$
	Térmico	$1,43066 - 0,29701x - 0,02282x^2 - 0,04852x^3 - 0,08336x^4$
Absorção	Rápido	$0,00970 - 0,00026x - 0,00002x^2 - 0,00011x^3 - 0,00016x^4$
	Térmico	$0,12052 - 0,01362x + 0,00083x^2 - 0,00215x^3 - 0,00366x^4$
Captura	Rápido	$0,00783 - 0,00022x - 0,00002x^2 - 0,00009x^3 - 0,00014x^4$
	Térmico	$0,08197 - 0,01190x + 0,00029x^2 - 0,00150x^3 - 0,00277x^4$
Nu-Fissão	Rápido	$0,00510 - 0,00012x - 0,00001x^2 - 0,00005x^3 - 0,00008x^4$
	Térmico	$0,10416 - 0,00412x + 0,00149x^2 - 0,00178x^3 - 0,00241x^4$
Transporte	Rápido	$0,23629 - 0,01832x - 0,00269x^2 - 0,00385x^3 - 0,00651x^4$
	Térmico	$0,91759 - 0,16273x - 0,01691x^2 - 0,02720x^3 - 0,04803x^4$
Espalhamento 1-1	–	$0,58192 - 0,07222x - 0,01048x^2 - 0,01531x^3 - 0,02585x^4$
Espalhamento 1-2	–	$0,02373 - 0,00468x - 0,00069x^2 - 0,00097x^3 - 0,00164x^4$
Espalhamento 2-2	–	$1,43066 - 0,29701x - 0,02282x^2 - 0,04852x^3 - 0,08336x^4$

De forma análoga ao ciclo anterior, o aumento da temperatura do moderador adicionado à presença das varetas absorvedoras, conduz a um aumento na taxa de absorção e, por consequência, uma diminuição no número de fissões.

A expansão polinomial do fator de multiplicação infinito, em função da densidade e temperatura do moderador é dada pela função abaixo:

$$k_{\infty} = 0,76703 + 0,03429x + 0,00667x^2 - 0,00435x^3 + 0,00336x^4 \quad (7.10)$$

As FIG. 7.64 a 7.70 apresentam o comportamento das seções de choque e do fator de multiplicação infinito, em função da temperatura e, consequentemente, densidade do moderador.

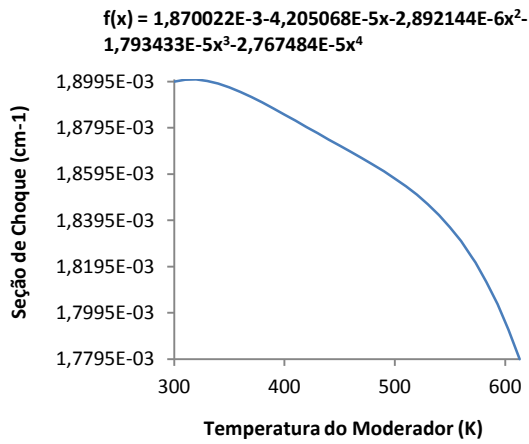


FIG. 7.64 Seção de choque de fissão do grupo rápido.

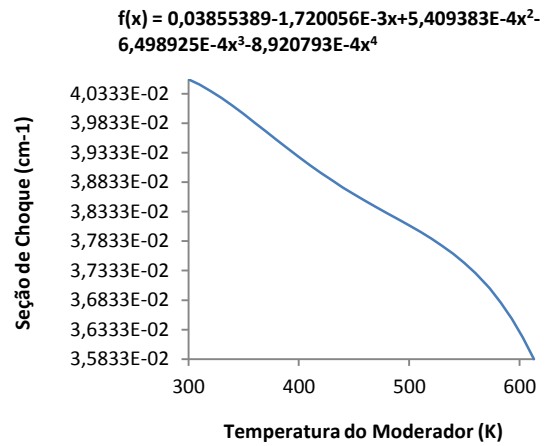


FIG. 7.65 Seção de choque de fissão do grupo térmico.

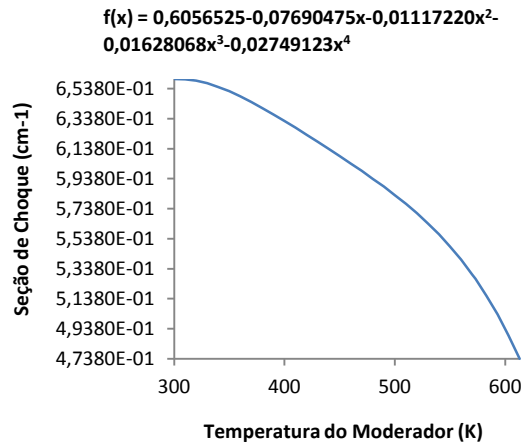


FIG. 7.66 Seção de choque de espalhamento do grupo rápido.

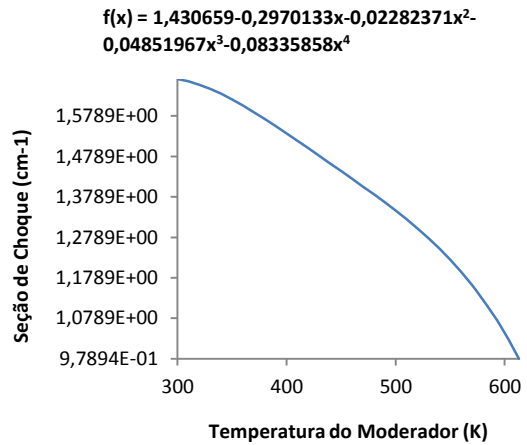


FIG. 7.67 Seção de choque de espalhamento do grupo térmico.

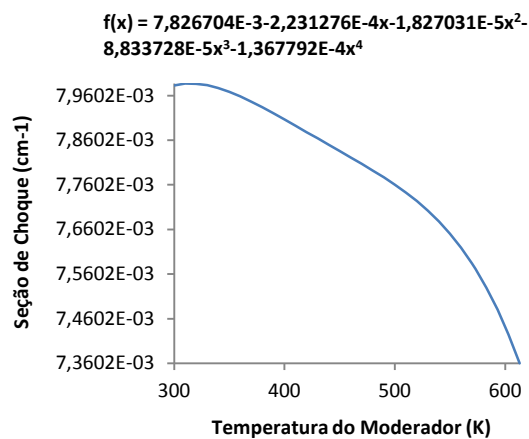


FIG. 7.68 Seção de choque de captura do grupo rápido.

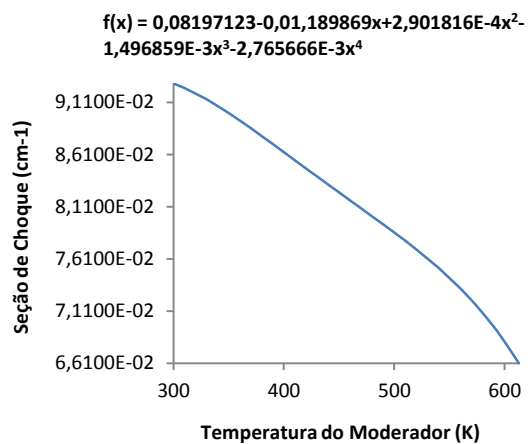


FIG. 7.69 Seção de choque de captura do grupo térmico.

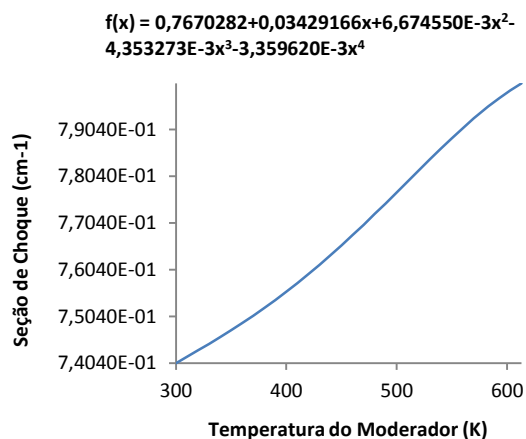


FIG. 7.70 Fator de multiplicação em função da temperatura do moderador.

7.4.3 PARAMETRIZAÇÃO EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE BORO SOLÚVEL

As expansões polinomiais das seções de choque macroscópicas, em função da concentração de boro, descritas na TAB. 7.13, revelaram um aumento da taxa de absorção e por consequência, uma diminuição no número de fissões, com a presença das varetas absorvedoras de $Gd_2O_3 - UO_2$ e com o aumento da concentração de boro solúvel.

TAB. 7.13 Seções de choque em função da concentração de boro solúvel em um EC com veneno queimável no segundo ciclo de queima.

Seção de Choque	Grupo	Expansão Polinomial
Fissão	Rápido	0,00182
	Térmico	$0,03654 - 0,00144x + 0,00010x^2 - 0,00001x^3$
Total	Rápido	$0,53637 - 0,00007x$
	Térmico	$1,25614 - 0,01152x + 0,00146x^2 - 0,00014x^3 + 0,00002x^4$
Espalhamento Total	Rápido	$0,52696 - 0,00027x - 0,00001x^2$
	Térmico	$1,14287 - 0,02459x + 0,00209x^2 - 0,00018x^3$
Absorção	Rápido	$0,00946 + 0,00020x$
	Térmico	$0,11326 + 0,01307x - 0,00059x^2 + 0,00005x^3$
Captura	Rápido	$0,00764 + 0,00020x$
	Térmico	$0,07672 + 0,01451x - 0,00069x^2 + 0,00006x^3$
Nu-Fissão	Rápido	$0,00496 - 0,00001x$
	Térmico	$0,09915 - 0,00381x + 0,00025x^2 - 0,00002x^3$
Transporte	Rápido	$0,21756 - 0,0003x$
	Térmico	$0,75703 - 0,01163x + 0,00179x^2 - 0,00020x^3 + 0,00002x^4$
Espalhamento 1-1	–	$0,50806 - 0,00010x - 0,00001x^2 + 0,00001x^4$
Espalhamento 1-2	–	$0,01890 - 0,00017x$
Espalhamento 2-2	–	$1,14287 - 0,02459x + 0,00209x^2 - 0,00018x^3$

A EQ. 7.11 descreve o comportamento do fator de multiplicação infinito obtido através da variação da concentração de boro solúvel, conforme:

$$k_{\infty} = 0,75949 - 0,09620x + 0,01592x^2 - 0,00281x^3 + 0,00044x^4 \quad (7.11)$$

As FIG. 7.71 a 7.77 descrevem o comportamento das seções de choque e fator de multiplicação analisados, frente à variação da concentração de boro solúvel.

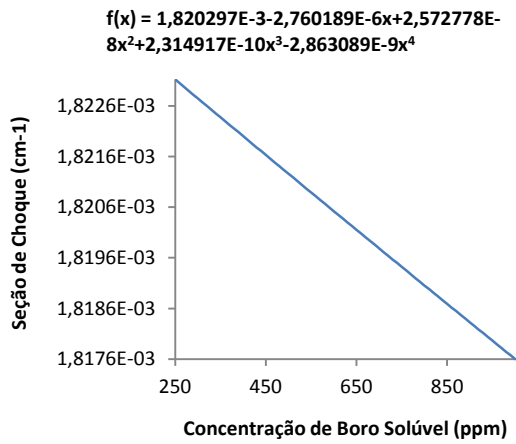


FIG. 7.71 Seção de choque de fissão do grupo rápido.

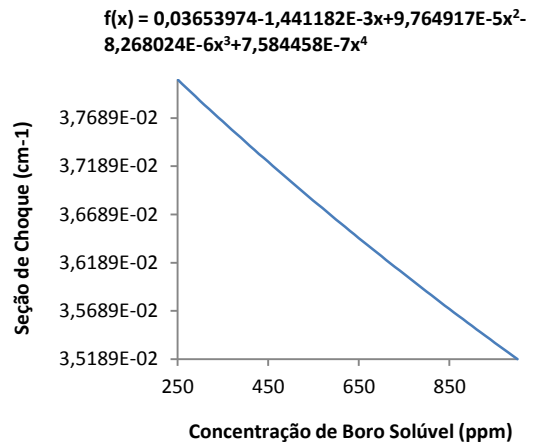


FIG. 7.72 Seção de choque de fissão do grupo térmico.

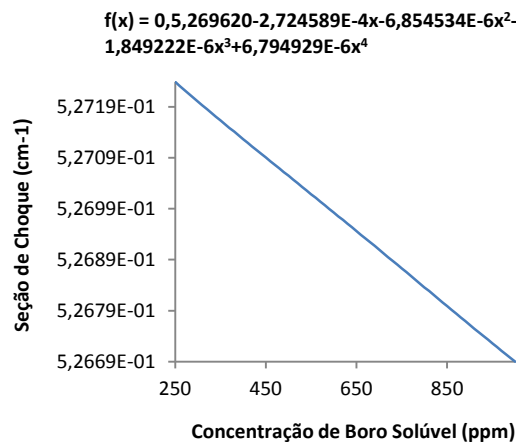


FIG. 7.73 Seção de choque de espalhamento do grupo rápido.

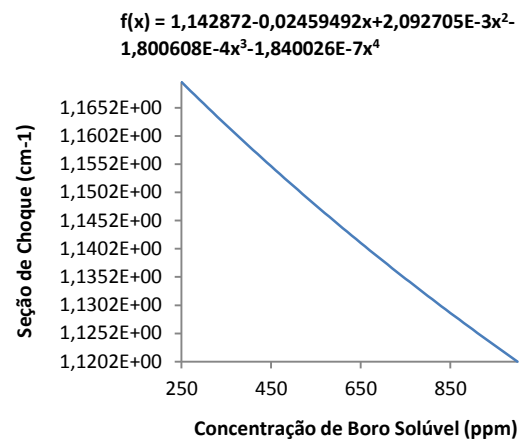


FIG. 7.74 Seção de choque de espalhamento do grupo térmico.

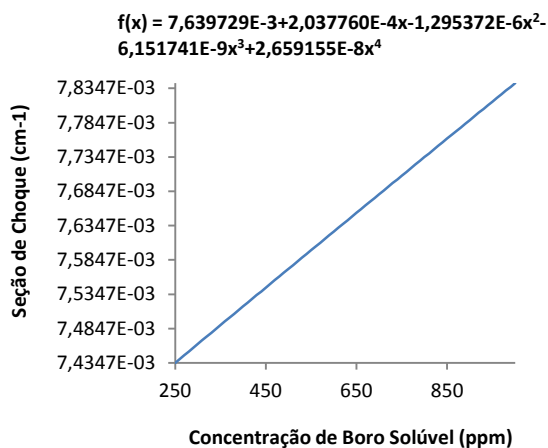


FIG. 7.75 Seção de choque de captura do grupo rápido.

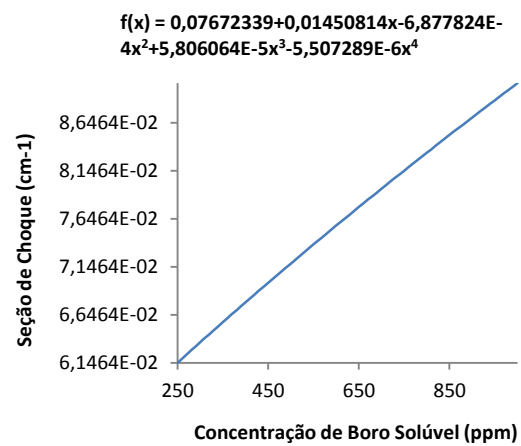


FIG. 7.76 Seção de choque de captura do grupo térmico.

Devido a elevada seção de choque de captura de nêutrons exibida pelo $^{10}_5B$ causa um aumento na absorção de nêutrons e altera o fator de multiplicação k , ou seja, diminuindo a taxa de fissão.

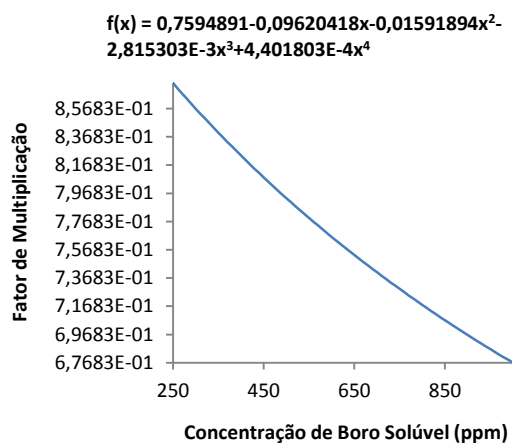


FIG. 7.77 Fator de multiplicação em função da concentração de boro solúvel.

7.4.4 PARAMETRIZAÇÃO EM FUNÇÃO DO ENRIQUECIMENTO DE $^{235}_{92}U$

As equações parametrizadas das seções de choque macroscópicas, em função da concentração de $^{235}_{92}U$, estão representadas na TAB. 7.14. A concentração de urânio variou de 2 a 5 %.

TAB. 7.14 Seções de choque em função da concentração do enriquecimento de urânio em um EC com veneno queimável no segundo ciclo de queima.

Seção de Choque	Grupo	Expansão Polinomial
Fissão	Rápido	$0,00195 + 0,00041x + 0,00003x^2 - 0,00001x^3$
	Térmico	$0,03991 + 0,00840x - 0,00091x^2 - 0,00044x^3 + 0,00034x^4$
Total	Rápido	$0,53637 - 0,00013x - 0,00012x^2 + 0,00002x^3 - 0,00001x^4$
	Térmico	$1,25873 - 0,00453x + 0,00076x^2 + 0,00039x^3 + 0,00053x^4$
Espalhamento Total	Rápido	$0,52684 - 0,00068x - 0,00015x^2 + 0,00003x^3 - 0,00002x^4$
	Térmico	$1,14641 - 0,01591x - 0,00345x^2 + 0,00088x^3 + 0,00121x^4$
Absorção	Rápido	$0,00957 + 0,00055x + 0,00004x^3 - 0,00001x^3$
	Térmico	$0,11232 + 0,01137x + 0,00270x^2 - 0,00047x^3 + 0,00069x^4$
Captura	Rápido	$0,00753 + 0,00015x + 0,00001x^2$
	Térmico	$0,06201 - 0,00035x + 0,00014x^2 - 0,00005x^3 - 0,00002x^4$

Nu-Fissão	Rápido	$0,00762 + 0,00014x + 0,00001x^2$
	Térmico	$0,07241 + 0,00297x + 0,00360x^2 - 0,00003x^3 - 0,00103x^4$
Transporte	Rápido	$0,21760 + 0,00005x - 0,00009x^2 + 0,00001x^3$
	Térmico	$0,75679 - 0,01392x - 0,00268x^2 + 0,00078x^3 + 0,00114x^4$
Espalhamento 1-1	–	$0,50801 - 0,00028x - 0,00012x^2 + 0,00002x^3 + 0,00002x^4$
Espalhamento 1-2	–	$0,01883 - 0,00039x - 0,00003x^2 + 0,00001x^3$
Espalhamento 2-2	–	$1,14641 - 0,01591x - 0,00345x^2 + 0,00088x^3 + 0,00121x^4$

As funções descritas a partir da variação do enriquecimento do urânio revelam um aumento um aumento na taxa de absorção, tanto na faixa rápida como na faixa térmica de energia, visto que há um aumento nas taxas de captura e de fissão.

A parametrização do fator de multiplicação infinito, em função do enriquecimento do $^{235}_{92}U$ é dada pela função abaixo:

$$k_{\infty} = 0,82063 + 0,07043x - 0,03542x^2 - 0,00223x^3 + 0,01085x^4 \quad (7.12)$$

Os gráficos apresentados nas FIG. 7.78 a 7.84 demonstram o comportamento das seções de choque analisadas, assim como o comportamento do fator de multiplicação infinito.

O aumento do enriquecimento de urânio faz com que haja mais isótopos físeis, ou seja, mais isótopos de $^{235}_{92}U$ no combustível, aumentando assim a taxa de fissão. Quanto mais fissões ocorrem dentro do reator, mais nêutrons serão gerados, aumentando a sua população.

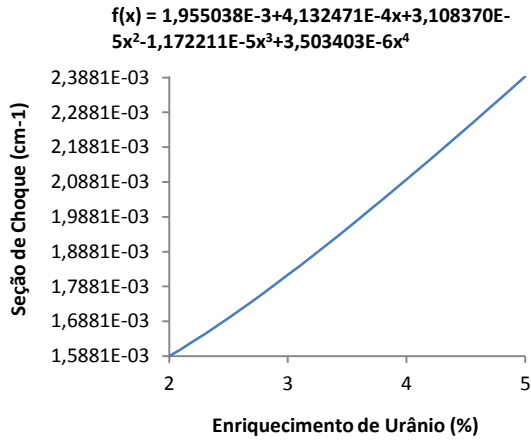


FIG. 7.78 Seção de choque de fissão do grupo rápido.

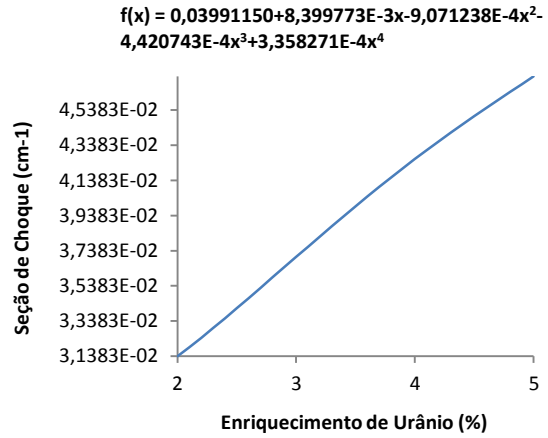


FIG. 7.79 Seção de choque de fissão do grupo térmico.

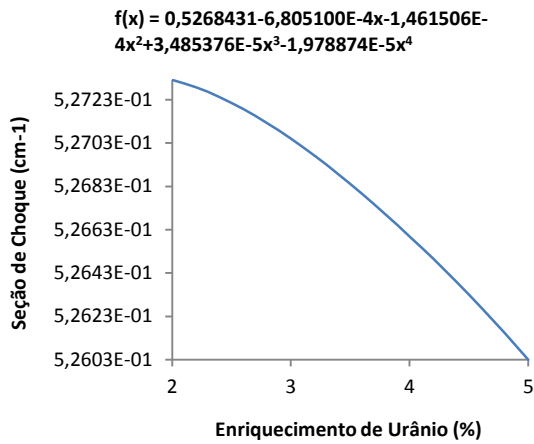


FIG. 7.80 Seção de choque de espalhamento do grupo rápido.

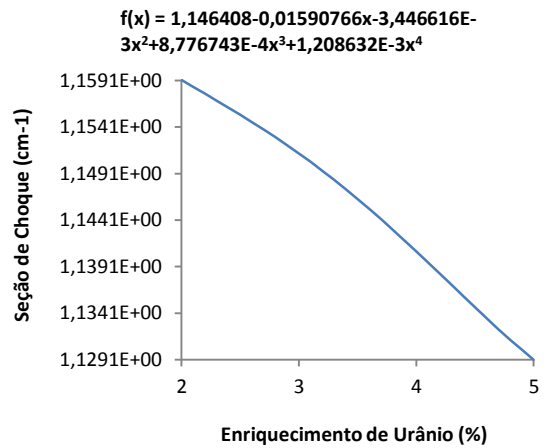


FIG. 7.81 Seção de choque de espalhamento do grupo térmico.

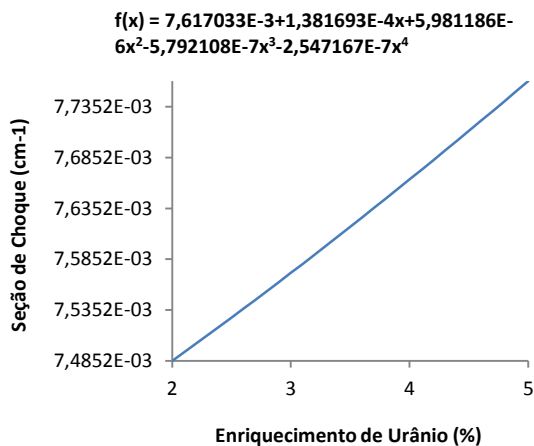


FIG. 7.82 Seção de choque de captura do grupo rápido.

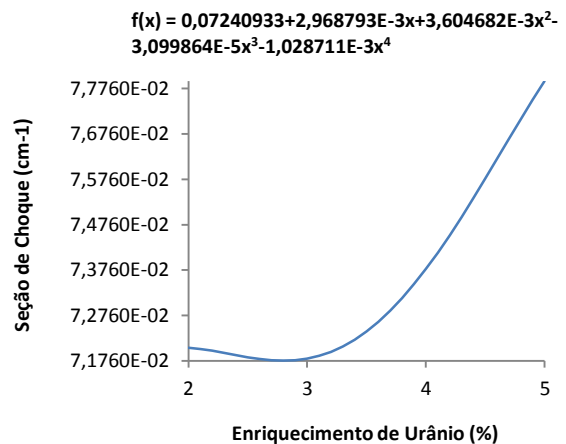


FIG. 7.83 Seção de choque de captura do grupo térmico.

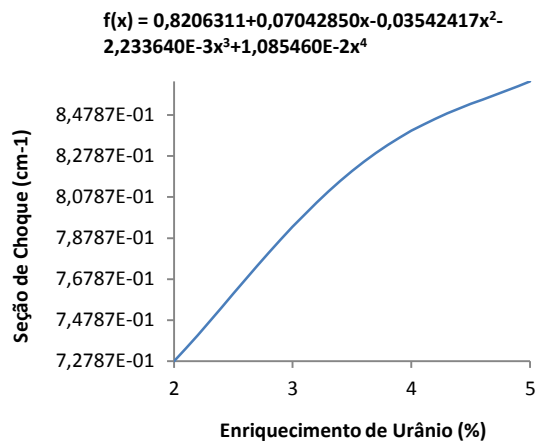


FIG. 7.84 Fator de multiplicação em função do enriquecimento de urânio.

7.5 CICLO 3

A nova composição referente à depleção do combustível do ciclo 2 está apresentada na TAB. 7.15. A queima foi feita considerando os enriquecimentos presentes nas diferentes varetas de combustível que compõe o núcleo do reator de ANGRA II.

TAB. 7.15 Composições isotópicas dos núclídeos no terceiro ciclo de queima em um EC com veneno queimável.

Nuclídeo	Number Density (atom/b-cm) x Enriquecimento de Urânio (%)				
	2 %	2,5 %	3 %	4 %	5 %
$^{234}_{92}\text{U}$	1,5450E-07	1,6400E-07	1,7350E-07	1,9230E-07	2,1010E-07
$^{235}_{92}\text{U}$	7,8280E-05	1,1370E-04	1,5670E-04	2,6310E-04	3,9110E-04
$^{236}_{92}\text{U}$	5,5500E-05	6,7860E-05	7,9390E-05	9,9780E-05	1,1690E-04
$^{238}_{92}\text{U}$	2,2180E-02	2,2140E-02	2,2090E-02	2,1960E-02	2,1820E-02
$^{238}_{94}\text{Pu}$	2,0230E-06	2,0050E-06	1,9540E-06	1,8080E-06	1,6500E-06
$^{239}_{94}\text{Pu}$	1,4220E-04	1,4510E-04	1,4830E-04	1,5470E-04	1,6070E-04
$^{240}_{94}\text{Pu}$	6,2330E-05	5,9930E-05	5,7400E-05	5,2300E-05	4,7560E-05
$^{241}_{94}\text{Pu}$	3,9040E-05	3,8130E-05	3,7160E-05	3,5030E-05	3,2720E-05
$^{242}_{94}\text{Pu}$	1,7950E-05	1,5670E-05	1,3650E-05	1,0370E-05	7,9790E-06
$^{243}_{94}\text{Pu}$	6,0130E-09	5,1680E-09	4,3860E-09	3,1940E-09	2,3300E-09
$^{241}_{95}\text{Am}$	1,0710E-06	1,0660E-06	1,0590E-06	1,0330E-06	9,9270E-07
$^{242}_{95}\text{Am}^*$	1,5820E-08	1,5900E-08	1,5980E-08	1,5990E-08	1,5680E-08
$^{243}_{95}\text{Am}$	4,7980E-06	3,9910E-06	3,3180E-06	2,3120E-06	1,6420E-06
$^{242}_{96}\text{Cm}$	4,5630E-07	4,1890E-07	3,8240E-07	3,1540E-07	2,5910E-07
$^{243}_{96}\text{Cm}$	1,2200E-08	1,0630E-08	9,2080E-09	6,8820E-09	5,1700E-09
$^{244}_{96}\text{Cm}$	2,1030E-06	1,6080E-06	1,2350E-06	7,4720E-07	4,7030E-07
$^{245}_{96}\text{Cm}$	1,5640E-07	1,1610E-07	8,6690E-08	4,9710E-08	2,9760E-08
$^{95}_{42}\text{Mo}$	2,3410E-05	2,4160E-05	2,4820E-05	2,5880E-05	2,6680E-05
$^{99}_{43}\text{Tc}$	4,2270E-05	4,2920E-05	4,3500E-05	4,4490E-05	4,5270E-05
$^{101}_{44}\text{Ru}$	4,2830E-05	4,2790E-05	4,2760E-05	4,2720E-05	4,2700E-05
$^{103}_{45}\text{Rh}$	2,2020E-05	2,1720E-05	2,1470E-05	2,1040E-05	2,0730E-05
$^{109}_{47}\text{Ag}$	4,7670E-06	4,4280E-06	4,1100E-06	3,5440E-06	3,0860E-06
$^{133}_{55}\text{Cs}$	4,3370E-05	4,4010E-05	4,4620E-05	4,5650E-05	4,6480E-05
$^{143}_{60}\text{Nd}$	2,5310E-05	2,6800E-05	2,8230E-05	3,0780E-05	3,2890E-05
$^{145}_{60}\text{Nd}$	2,2990E-05	2,3710E-05	2,4360E-05	2,5480E-05	2,6370E-05
$^{147}_{62}\text{Sm}$	9,5300E-07	9,9510E-07	1,0350E-06	1,1080E-06	1,1680E-06
$^{149}_{62}\text{Sm}$	6,7920E-08	7,2290E-08	7,7600E-08	9,1490E-08	1,0890E-07
$^{150}_{62}\text{Sm}$	9,4910E-06	9,4590E-06	9,4290E-06	9,3660E-06	9,3000E-06
$^{151}_{62}\text{Sm}$	4,0580E-07	4,2300E-07	4,4420E-07	4,9670E-07	5,5650E-07
$^{152}_{62}\text{Sm}$	3,6100E-06	3,6030E-06	3,5970E-06	3,5850E-06	3,5760E-06
$^{153}_{63}\text{Eu}$	4,5920E-06	4,4810E-06	4,3720E-06	4,1620E-06	3,9740E-06
$^{155}_{64}\text{Gd}$	1,6330E-08	2,0840E-08	4,3260E-08	4,4860E-07	2,0260E-06
$^{16}_{8}\text{O}$	4,7360E-02	4,7360E-02	4,7360E-02	4,7370E-02	4,7370E-02

7.5.1 PARAMETRIZAÇÃO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DO COMBUSTÍVEL

Utilizando como composição para o combustível os dados apresentados na TAB. 7.15, foi possível processar as seções de choque em função da temperatura do combustível. As expansões polinomiais que representam o comportamento das seções de choque estão descritas na tabela 7.16, abaixo:

TAB. 7.16 Seções de choque em função da temperatura do combustível em um EC com veneno queimável no terceiro ciclo de queima.

Seção de Choque	Grupo	Expansão Polinomial
Fissão	Rápido	0,00169
	Térmico	$0,03460 + 0,00009x$
Total	Rápido	$0,53625 + 0,00034x - 0,00001x^2 + 0,00003x^3 - 0,00001x^4$
	Térmico	$1,26446 + 0,00017x + 0,00004x^3 - 0,00002x^4$
Espalhamento Total	Rápido	$0,52692 + 0,00012x - 0,00002x^2$
	Térmico	$1,15442 - 0,00032x + 0,00004x^2 + 0,00002x^3 - 0,00004x^4$
Absorção	Rápido	$0,00939 + 0,00023x + 0,00002x^3 - 0,00001x^4$
	Térmico	$0,11003 + 0,00049x - 0,00002x^2 + 0,00001x^3$
Captura	Rápido	$0,00770 + 0,00023x + 0,00002x^3 - 0,00001x^4$
	Térmico	$0,07543 + 0,00040x - 0,00001x^2 + 0,00001x^3$
Nu-Fissão	Rápido	$0,00467 - 0,00001x$
	Térmico	$0,09597 + 0,00027x$
Transporte	Rápido	$0,21724 - 0,00006x - 0,00001x^2 - 0,00001x^3$
	Térmico	$0,76724 + 0,00022x - 0,00001x^2 + 0,00003x^3 - 0,00001x^4$
Espalhamento 1-1	–	$0,50799 + 0,00029x - 0,00002x^2 + 0,00002x^3$
Espalhamento 1-2	–	$0,01892 - 0,00018x - 0,00001x^3 + 0,00001x^4$
Espalhamento 2-2	–	$1,15442 - 0,00032x + 0,00004x^2 + 0,00002x^3 - 0,00004x^4$

À medida que a temperatura do combustível se eleva os materiais que o compõe são expandidos com o calor, fazendo com que sua densidade diminua. Isto resulta no aumento do comprimento de difusão e no tempo de vida dos nêutrons térmicos. Ocorre também um aumento da probabilidade de fuga de nêutrons durante a moderação para energias térmicas e a captura de nêutrons térmicos. Diferentemente da análise do elemento combustível sem veneno queimável, e além da presença dos produtos de fissão na composição do combustível, possui as varetas de veneno queimável, proporcionando nuclídeos com uma elevada seção de choque de absorção, reduzindo o número de fissões e conseqüentemente a seção de choque de fissão.

A função resultante da expansão dos coeficientes de Tchebyshev, considerando as seções de choque em função da temperatura do combustível, é descrita na EQ. 7.13, abaixo:

$$k_{\infty} = 0,74942 - 0,00818x + 0,00018x^2 - 0,00070x^3 + 0,00027x^4 \quad (7.13)$$

Segue, abaixo, os gráficos apresentados nas FIG. 7.85 a 7.91, do comportamento das seções de choque e fator de multiplicação infinito em função da variação da temperatura do combustível.

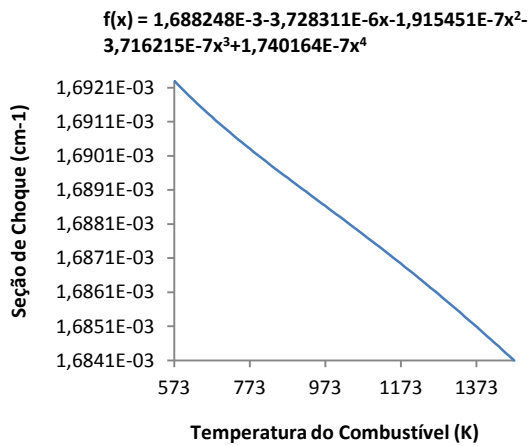


FIG. 7.85 Seção de choque de fissão do grupo rápido.

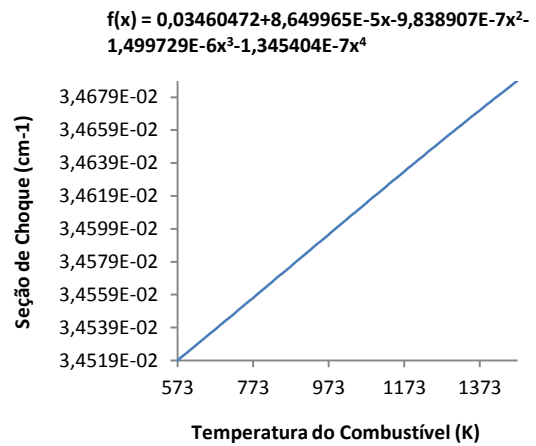


FIG. 7.86 Seção de choque de fissão do grupo térmico.

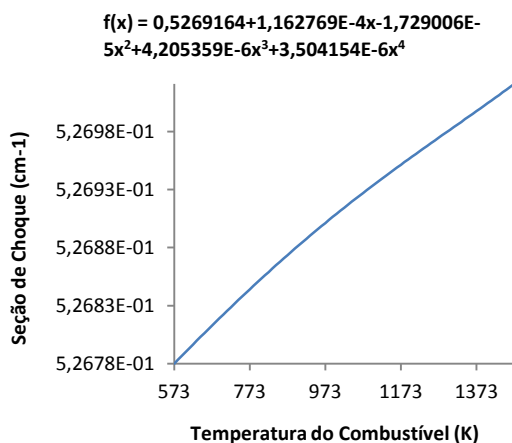


FIG. 7.87 Seção de choque de espalhamento do grupo rápido.

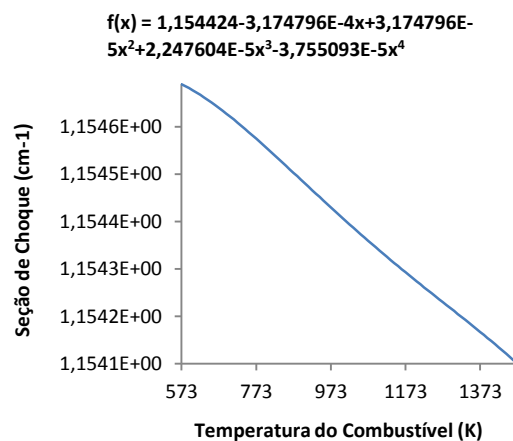


FIG. 7.88 Seção de choque de espalhamento do grupo térmico.

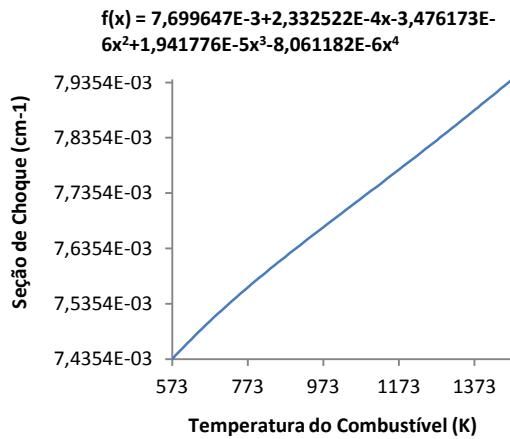


FIG. 7.89 Seção de choque de captura do grupo rápido.

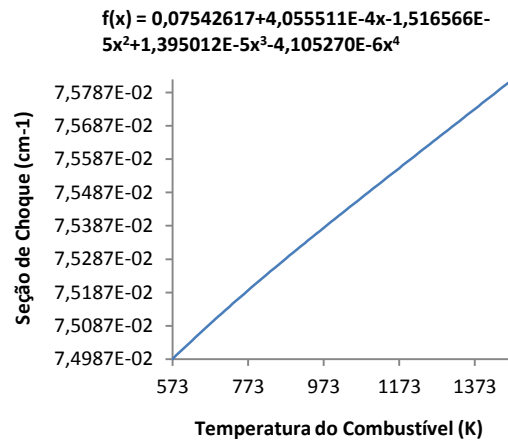


FIG. 7.90 Seção de choque de captura do grupo térmico.

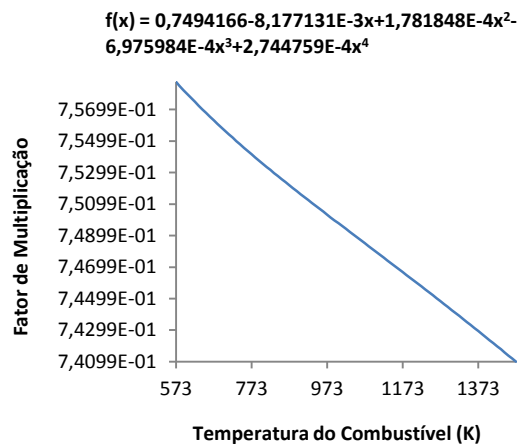


FIG. 7.91 Fator de multiplicação em função da temperatura do combustível.

7.5.2 PARAMETRIZAÇÃO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA E DENSIDADE DO MODERADOR

As funções resultantes da expansão dos coeficientes de Tchebyshev, frente à variação da temperatura e a densidade do moderador, estão descritas na TAB.7.17.

O aumento da temperatura do moderador conduz a uma diminuição da moderação de nêutrons e por consequência, uma diminuição no número de fissões e das taxas de espalhamento.

Observa-se também que o aumento da temperatura do moderador, conduz a um

endurecimento do espectro, resultando também em um alargamento da ressonância de absorção, em ressonâncias “low-lying” para o isótopo do $^{238}_{92}\text{U}$. Tais efeitos levam a um coeficiente de reatividade mais negativo. Neste caso, aumenta-se a absorção de nêutrons pelo $^{238}_{92}\text{U}$, devido ao nêutron se tornar mais transparente, ou seja, como a moderação diminui um maior número de nêutrons de uma vareta de combustível atinge a outra com energias maiores.

TAB. 7.17 Seções de choque em função da temperatura e densidade do moderador em um EC com veneno queimável no terceiro ciclo de queima.

Seção de Choque	Grupo	Expansão Polinomial
Fissão	Rápido	$0,00174 - 0,00004x - 0,00002x^3 - 0,00003x^4$
	Térmico	$0,03564 - 0,00111x + 0,00053x^2 - 0,00064x^3 - 0,00082x^4$
Total	Rápido	$0,61504 - 0,07709x - 0,01118x^2 - 0,01637x^3 - 0,02763x^4$
	Térmico	$1,55600 - 0,31152x - 0,02161x^2 - 0,05080x^3 - 0,08708x^4$
Espalhamento Total	Rápido	$0,60543 - 0,07683x - 0,01116x^2 - 0,01627x^3 - 0,02747x^4$
	Térmico	$1,43487 - 0,29850x - 0,02247x^2 - 0,04869x^3 - 0,08358x^4$
Absorção	Rápido	$0,00967 - 0,00027x - 0,00002x^2 - 0,00011x^3 - 0,00016x^4$
	Térmico	$0,12112 - 0,01302x + 0,00091x^2 - 0,00211x^3 - 0,00354x^4$
Captura	Rápido	$0,00793 - 0,00022x - 0,00002x^2 - 0,00009x^3 - 0,00014x^4$
	Térmico	$0,08548 - 0,01191x + 0,00038x^2 - 0,00147x^3 - 0,00272x^4$
Nu-Fissão	Rápido	$0,00481 - 0,00012x - 0,00001x^2 - 0,00005x^3 - 0,00008x^4$
	Térmico	$0,09855 - 0,00269x + 0,00148x^2 - 0,00178x^3 - 0,00227x^4$
Transporte	Rápido	$0,23591 - 0,01827x - 0,00268x^2 - 0,00384x^3 - 0,00648x^4$
	Térmico	$0,92526 - 0,16487x - 0,01662x^2 - 0,02735x^3 - 0,04829x^4$
Espalhamento 1-1	–	$0,58172 - 0,07216x - 0,01047x^2 - 0,01530x^3 - 0,02583x^4$
Espalhamento 1-2	–	$0,02371 - 0,00468x - 0,00069x^2 - 0,00097x^3 - 0,00164x^4$
Espalhamento 2-2	–	$1,43487 - 0,29850x - 0,02247x^2 - 0,04869x^3 - 0,08358x^4$

A equação 7.14 descreve o comportamento do fator de multiplicação infinito, em função da densidade e temperatura do moderador, conforme:

$$k_{\infty} = 0,72313 + 0,03623x + 0,00653x^2 - 0,00518x^3 - 0,00411x^4 \quad (7.14)$$

As FIG. 7.92 a 7.98 apresentam o comportamento das seções de choque e do fator de multiplicação infinito, em função da temperatura e, conseqüentemente, densidade do moderador.

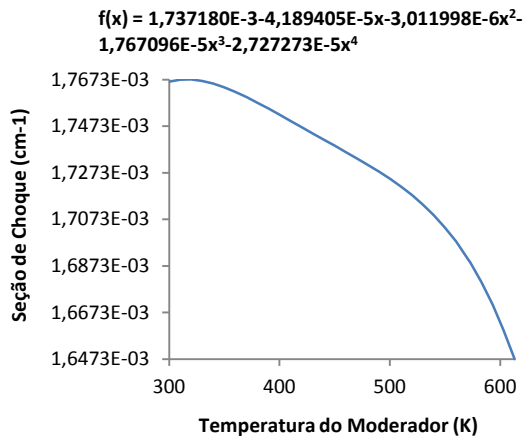


FIG. 7.92 Seção de choque de fissão do grupo rápido.

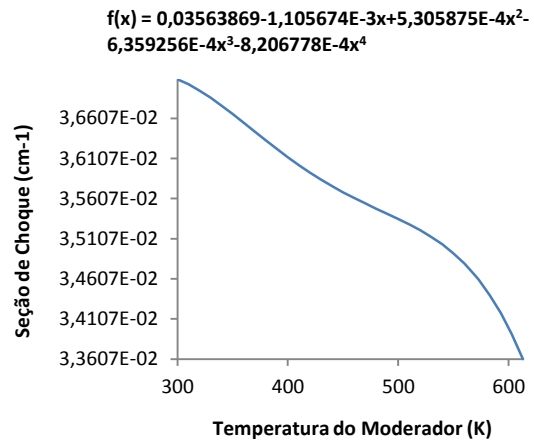


FIG. 7.93 Seção de choque de fissão do grupo térmico.

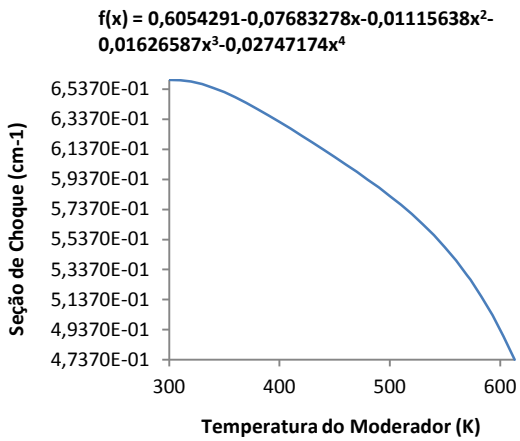


FIG. 7.94 Seção de choque de espalhamento do grupo rápido.

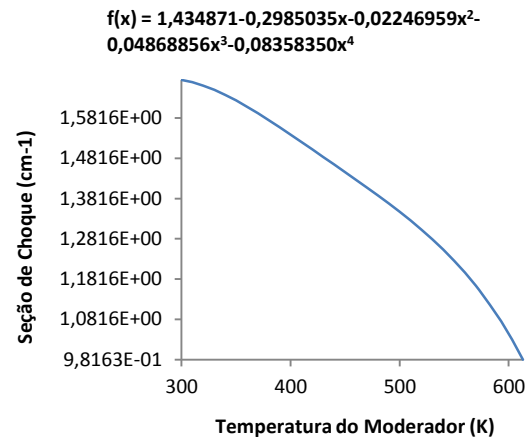


FIG. 7.95 Seção de choque de espalhamento do grupo térmico.

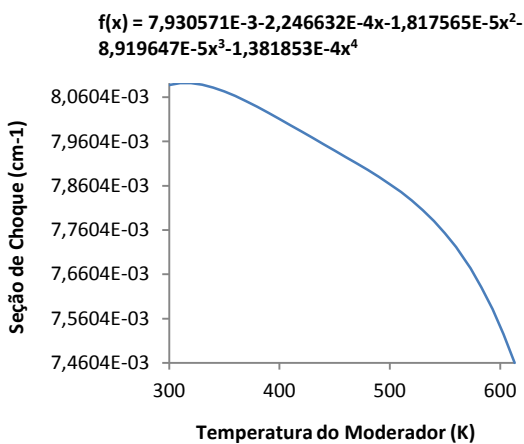


FIG. 7.96 Seção de choque de captura do grupo rápido.

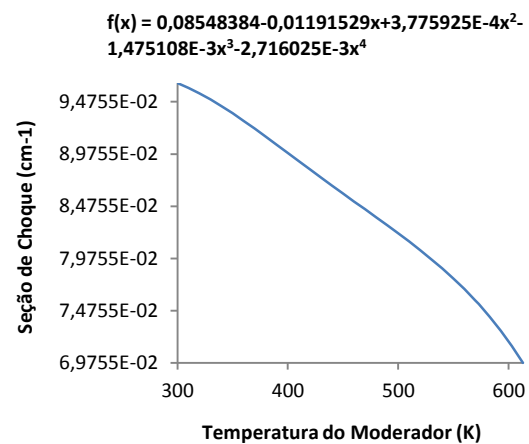


FIG. 7.97 Seção de choque de captura do grupo térmico.

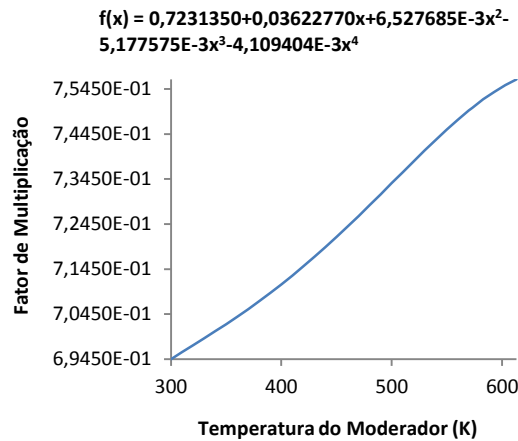


FIG. 7.98 Fator de multiplicação em função da temperatura do moderador.

7.5.3 PARAMETRIZAÇÃO EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE BORO SOLÚVEL

As expansões polinomiais das seções de choque macroscópicas, em função da concentração de boro, variando de 250 a 1000 ppm, estão descritas na TAB. 7.18.

TAB. 7.18 Seções de choque em função da concentração de boro solúvel em um EC com veneno queimável no terceiro ciclo de queima.

Seção de Choque	Grupo	Expansão Polinomial
Fissão	Rápido	0,00169
	Térmico	$0,03416 - 0,00127x + 0,00008x^2 - 0,00001x^3$
Total	Rápido	$0,53619 - 0,00007x - 0,00001x^2 + 0,00001x^4$
	Térmico	$1,26045 - 0,01144x + 0,00150x^2 - 0,00013x^3 + 0,00001x^4$
Espalhamento Total	Rápido	$0,52681 - 0,00027x$
	Térmico	$1,14592 - 0,02491x + 0,00210x^2 - 0,00020x^3 + 0,00004x^4$
Absorção	Rápido	$0,00943 + 0,00020x$
	Térmico	$0,11454 + 0,01348x - 0,00063x^2 + 0,00005x^3$
Captura	Rápido	$0,00774 + 0,00020x$
	Térmico	$0,08038 + 0,01475x - 0,00071x^2 + 0,00006x^3$
Nu-Fissão	Rápido	$0,00467 - 0,00001x$
	Térmico	$0,09476 - 0,00346x + 0,00022x^2 - 0,00002x^3$
Transporte	Rápido	$0,21724 - 0,00003x$
	Térmico	$0,76306 - 0,01185x + 0,00183x^2 - 0,00021x^3 + 0,00003x^4$
Espalhamento 1-1	–	$0,50792 - 0,00010x$
Espalhamento 1-2	–	$0,01889 - 0,00017x$
Espalhamento 2-2	–	$1,14592 - 0,02491x + 0,00210x^2 - 0,00020x^3 + 0,00004x^4$

O ácido bórico, H_3BO_3 , possui uma elevada seção de choque de captura de nêutrons, exibida pelo $^{10}_5B$, isótopo presente em 20 % do boro natural. Isto causa um aumento na absorção de nêutrons e por consequência uma diminuição do número de fissões.

A EQ. 7.15 descreve o comportamento do fator de multiplicação infinito obtido através da variação da concentração de boro solúvel, conforme:

$$k_{\infty} = 0,71813 - 0,09118x + 0,01531x^2 - 0,00276x^3 + 0,00044x^4 \quad (7.15)$$

As FIG. 7.99 a 7.105 descrevem o comportamento das seções de choque e fator de multiplicação analisados, frente à variação da concentração de boro solúvel.

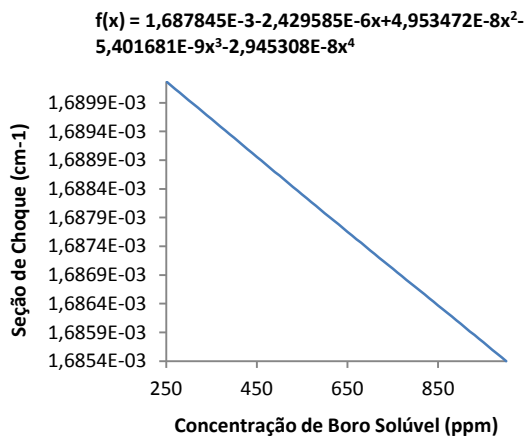


FIG. 7.99 Seção de choque de fissão do grupo rápido.

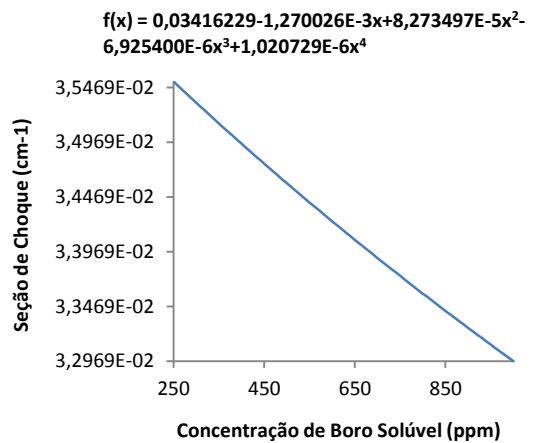


FIG. 7.100 Seção de choque de fissão do grupo térmico.

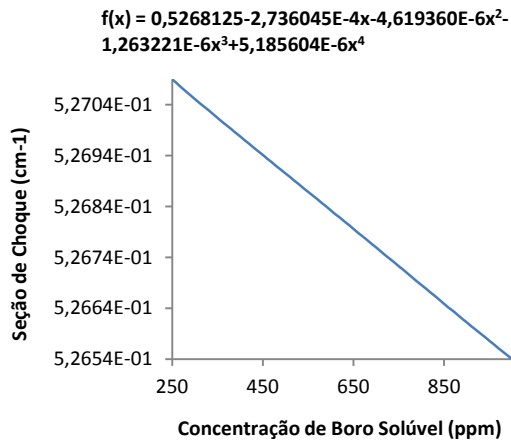


FIG. 7.101 Seção de choque de espalhamento do grupo rápido.

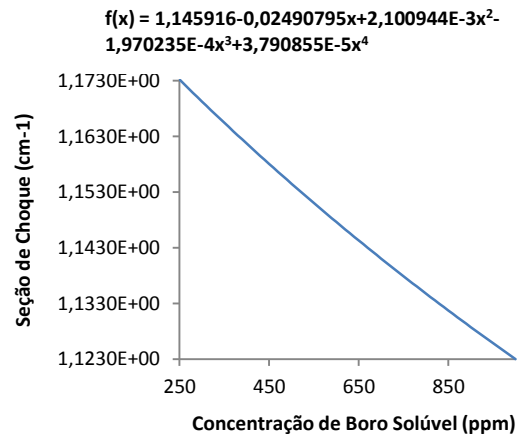


FIG. 7.102 Seção de choque de espalhamento do grupo térmico.

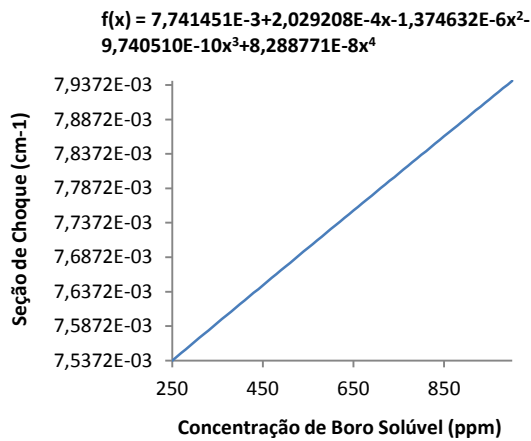


FIG. 7.103 Seção de choque de captura do grupo rápido.

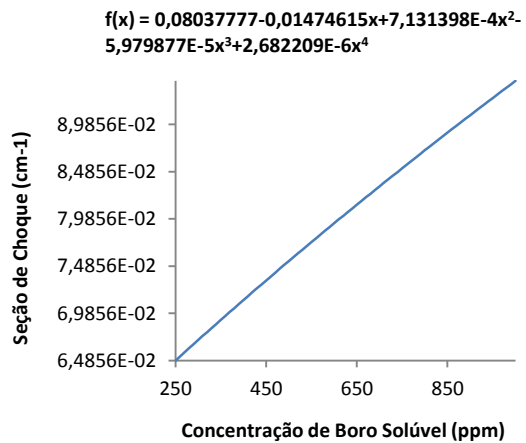


FIG. 7.104 Seção de choque de captura do grupo térmico.

Análogo à seção de choque de absorção, há um aumento na taxa de captura de nêutrons.

A diminuição da população de nêutrons é explicada pelo aumento da concentração do sequestrante natural de nêutrons, o $^{10}_5B$.

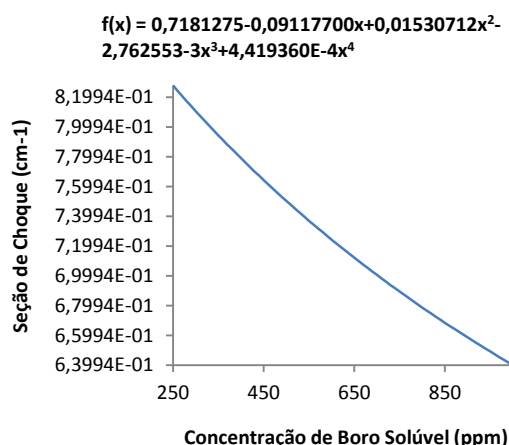


FIG. 7.105 Fator de multiplicação em função da concentração de boro solúvel.

7.5.4 PARAMETRIZAÇÃO EM FUNÇÃO DO ENRIQUECIMENTO DE $^{235}_{92}\text{U}$

As equações parametrizadas das seções de choque macroscópicas, em função da concentração de $^{235}_{92}\text{U}$, estão representadas na TAB. 7.19.

TAB. 7.19 Seções de choque em função da concentração do enriquecimento de urânio em um EC com veneno queimável no terceiro ciclo de queima.

Seção de Choque	Grupo	Expansão Polinomial
Fissão	Rápido	$0,00179 + 0,00031x + 0,00005x^2 - 0,00001x^3$
	Térmico	$0,03694 + 0,00717x + 0,00024x^2 - 0,00057x^3$
Total	Rápido	$0,53622 - 0,00004x - 0,00013x^2 + 0,00003x^3 + 0,00002x^4$
	Térmico	$1,26346 - 0,00314x - 0,00065x^2 - 0,00006x^3 + 0,00013x^4$
Espalhamento Total	Rápido	$0,52677 - 0,00047x - 0,00019x^2 + 0,00004x^3 + 0,00003x^4$
	Térmico	$1,15090 - 0,01156x - 0,00279x^2 - 0,00029x^3 + 0,00011x^4$
Absorção	Rápido	$0,00950 + 0,00043x + 0,00005x^3 - 0,00001x^3$
	Térmico	$0,11255 + 0,00842x + 0,00217x^2 + 0,00024x^3$
Captura	Rápido	$0,00771 + 0,00012x + 0,00001x^2$
	Térmico	$0,07561 + 0,00125x + 0,00193x^2 + 0,00081x^3$
Nu-Fissão	Rápido	$0,00491 + 0,00076x + 0,00011x^2 - 0,00002x^3$
	Térmico	$0,10158 + 0,01721x + 0,00041x^2 - 0,00142x^3 + 0,00001x^4$
Transporte	Rápido	$0,21728 + 0,00008x - 0,00009x^2 + 0,00002x^3 + 0,00002x^4$
	Térmico	$0,76397 - 0,01043x - 0,00219x^2 - 0,00025x^3 + 0,00013x^4$
Espalhamento 1-1	–	$0,50792 - 0,00016x - 0,00015x^2 + 0,00003x^3 + 0,00003x^4$
Espalhamento 1-2	–	$0,01885 - 0,00031x - 0,00004x^2 + 0,00001x^3$
Espalhamento 2-2	–	$1,15090 - 0,01156x - 0,00279x^2 - 0,00029x^3 + 0,00011x^4$

As funções descritas a partir da variação do enriquecimento do urânio revelam um aumento um aumento na taxa de absorção, tanto na faixa rápida como na faixa térmica de energia, visto que há um aumento nas taxas de captura e de fissão.

A parametrização do fator de multiplicação infinito, em função do enriquecimento do $^{235}_{92}\text{U}$ é dada pela função abaixo:

$$k_{\infty} = 0,77480 + 0,07050x + 0,01219x^2 - 0,01002x^3 + 0,00108x^4 \quad (7.16)$$

Os gráficos apresentados nas FIG. 7.106 a 7.112 demonstram o comportamento das seções de choque analisadas, assim como o comportamento do fator de multiplicação infinito.

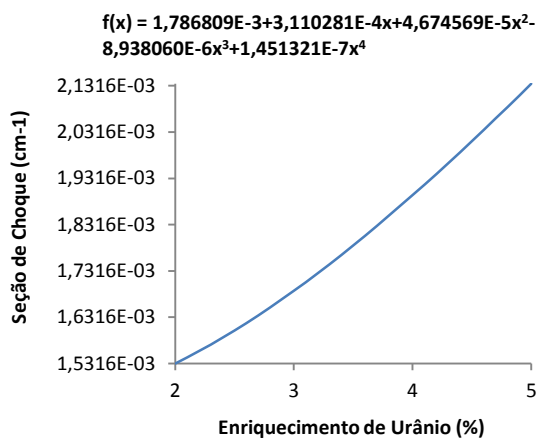


FIG. 7.106 Seção de choque de fissão do grupo rápido.

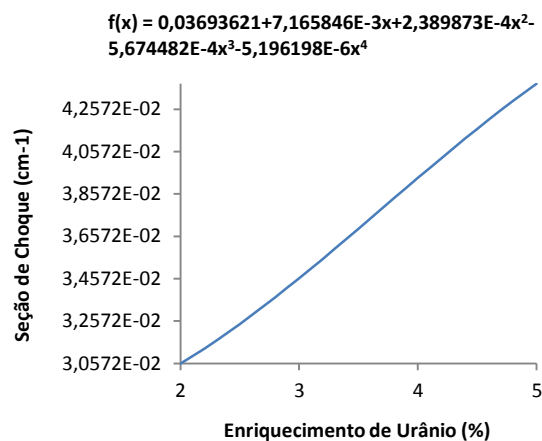


FIG. 7.107 Seção de choque de fissão do grupo térmico.

O aumento do enriquecimento de urânio faz com que haja mais isótopos físeis, ou seja, mais isótopos de $^{235}_{92}\text{U}$ no combustível, aumentando assim a taxa de fissão. Quanto mais fissões ocorrem dentro do reator, mais nêutrons serão gerados, aumentando a sua população.

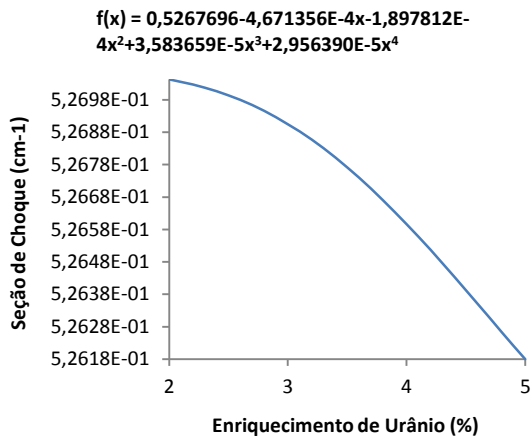


FIG. 7.108 Seção de choque de espalhamento do grupo rápido.

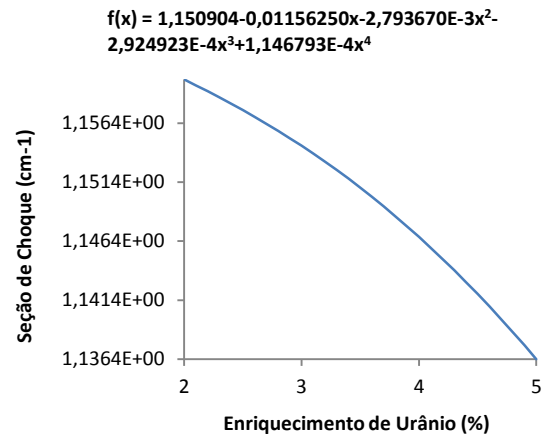


FIG. 7.109 Seção de choque de espalhamento do grupo térmico.

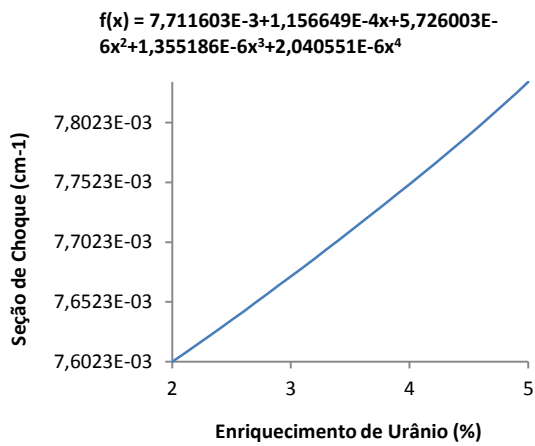


FIG. 7.110 Seção de choque de captura do grupo rápido.

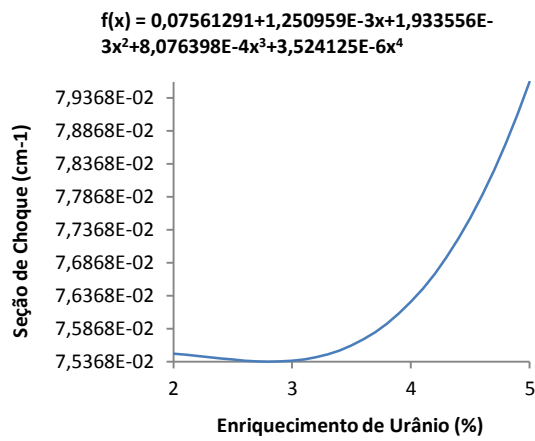


FIG. 7.111 Seção de choque de captura do grupo térmico.

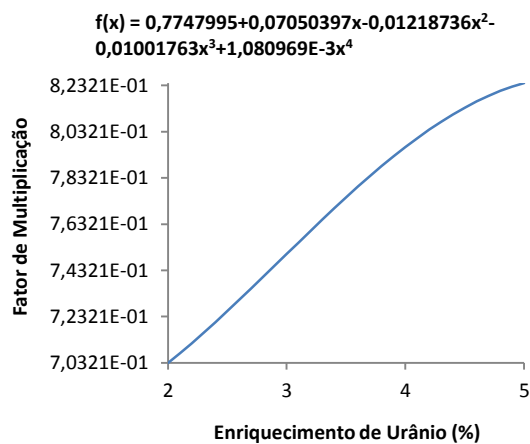


FIG. 7.112 Fator de multiplicação em função do enriquecimento de urânio.

8 OUTROS RESULTADOS

8.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo demonstra a eficiência do método desenvolvido nesta dissertação de mestrado, apresentando as comparações feitas pelo uso das expansões provenientes do método de parametrização por polinômios de Tchebyshev com o cálculo direto, obtido através da simulação feita no código SCALE 6.1, e com o método de parametrização utilizando os polinômios de Lagrange. Também são descritos testes de parâmetros de projeto, tal como, os cálculos do coeficiente de reatividade de temperatura e cálculo do fator de fissão rápida.

8.2 COMPARAÇÃO EXPANSÃO X CÁLCULO DIRETO

Com o intuito de verificar a eficiência da parametrização desenvolvida nesta dissertação de mestrado, foram comparados os resultados apresentados a partir da expansão dos polinômios de Tchebyshev com os valores obtidos através da simulação realizada no código nuclear SCALE 6.1.

Para isto, foi escolhido um valor de temperatura do combustível, para o elemento combustível sem veneno queimável, e um valor de temperatura do moderador, para o elemento combustível com veneno queimável. Para ambos os valores de temperatura, combustível e moderador, a escolha se deu para valores dentro do intervalo apresentados na TAB. 3.1, do capítulo 3.

Inicialmente, fez-se uma comparação dos resultados da análise do elemento combustível sem veneno queimável, tanto para o grupo rápido como para o grupo térmico, grupo 1 e 2, respectivamente. Foi escolhido o valor de temperatura de 1248 K, mantendo-se os demais parâmetros com os valores de referência apresentados na TAB. 3.2, para os ciclos zero e três. A TAB. 8.1 apresenta os resultados

provenientes da expansão dos polinômios de Tchebyshev e dos valores obtidos através da simulação no código nuclear, assim como, os respectivos desvios.

TAB. 8.1 Comparação entre o resultado obtido a partir do código SCALE e pela expansão dos polinômios de Tchebyshev em função da temperatura do combustível de 1248 K em um elemento combustível sem veneno queimável.

Seção de Choque	Grupos	Ciclo Zero			Ciclo Três		
		SCALE	Expansão	Desvio (%)	SCALE	Expansão	Desvio (%)
Fissão	1	0,00229	0,00229	0,00083	0,00174	0,00174	0,00396
	2	0,04120	0,04120	0,00637	0,03720	0,03720	0,00044
Total	1	0,53486	0,53487	0,00161	0,53388	0,53388	0,00058
	2	1,23392	1,23388	0,00320	1,26105	1,26105	0,00021
Espalhamento	1	0,52540	0,52540	0,00058	0,52446	0,52446	0,00026
	2	1,15038	1,15034	0,00389	1,15745	1,15746	0,00080
Absorção	1	0,00950	0,00951	0,05111	0,00946	0,00947	0,02916
	2	0,08354	0,08354	0,00200	0,10359	0,10359	0,00157
Captura	1	0,00722	0,00722	0,06758	0,00773	0,00773	0,03660
	2	0,04235	0,04234	0,00228	0,06639	0,06639	0,00220
Nu-Fissão	1	0,00589	0,00589	0,00188	0,00480	0,00480	0,00394
	2	0,10039	0,10039	0,00705	0,10281	0,10281	0,00003
Transporte	1	0,21785	0,21784	0,00462	0,21523	0,21523	0,00041
	2	0,74517	0,74514	0,00318	0,76871	0,76872	0,00065
Espalhamento 1-1	–	0,50648	0,50649	0,00130	0,50566	0,50566	0,00018
Espalhamento 1-2	–	0,01892	0,01892	0,01821	0,01881	0,01881	0,01222
Espalhamento 2-2	–	1,15038	1,15034	0,00389	1,15745	1,15746	0,00080

A análise dos resultados apresentados de ambas as fontes, mostra que os valores de seção de choque obtidos apresentam uma excelente concordância, com desvios inferiores a 0,07 %. Isso comprova a eficiência da obtenção dos dados de seções de choque macroscópicas a partir da expansão dos polinômios de Tchebyshev.

A comparação obtida na TAB. 8.1 foi repetida para os valores apresentados na TAB. 8.2, porém utilizou-se o elemento combustível com veneno queimável, ou seja, combustível com varetas combustíveis de Gd_2O_3 e foi escolhido o valor de 450 K, e respectiva densidade de $0,899661 \text{ g/cm}^3$, mantendo os demais parâmetros como valores de referência, conforme a TAB. 3.1.

TAB. 8.2 Comparação entre o resultado obtido a partir do código SCALE e pela expansão dos polinômios de Tchebyshev em função da temperatura do moderador de 450 K em um elemento combustível com veneno queimável.

Seção de Choque	Grupos	Ciclo Zero			Ciclo Três		
		SCALE	Expansão	Desvio (%)	SCALE	Expansão	Desvio (%)
Fissão	1	0,00229	0,00229	0,03834	0,00174	0,00174	0,04451
	2	0,04269	0,04267	0,04450	0,03571	0,03569	0,08072
Total	1	0,62002	0,61996	0,01047	0,61829	0,61823	0,01051
	2	1,54424	1,54451	0,01764	1,56863	1,56890	0,01747
Espalhamento	1	0,61032	0,61026	0,01005	0,60866	0,60860	0,00990
	2	1,43816	1,43844	0,01957	1,44695	1,44723	0,01959
Absorção	1	0,00975	0,00975	0,04417	0,00968	0,00968	0,04584
	2	0,10608	0,10607	0,00337	0,12168	0,12167	0,01230
Captura	1	0,00746	0,00746	0,04595	0,00794	0,00794	0,04612
	2	0,06338	0,06340	0,02433	0,08597	0,08598	0,01614
Nu-Fissão	1	0,00591	0,00591	0,04014	0,00482	0,00482	0,04523
	2	0,10403	0,10398	0,04428	0,09875	0,09867	0,08175
Transporte	1	0,23875	0,23874	0,00518	0,23668	0,23666	0,00492
	2	0,90369	0,90381	0,01405	0,93194	0,93209	0,01610
Espalhamento 1-1	–	0,58620	0,58614	0,01018	0,58476	0,58470	0,01002
Espalhamento 1-2	–	0,02411	0,02411	0,00691	0,02390	0,02390	0,00702
Espalhamento 2-2	–	1,43816	1,43844	0,01957	1,44695	1,44723	0,01959

A partir da análise dos erros relativos, onde se tem desvios menores do que 0,0082 % pode-se confirmar a efetividade do método desenvolvido nesta dissertação de mestrado.

8.3 CÁLCULO DO COEFICIENTE DE REATIVIDADE DE TEMPERATURA

As variações da temperatura do sistema alteram a multiplicação de nêutrons no núcleo do reator. Isto se dá devido às mudanças na densidade dos componentes presentes no núcleo, provenientes da expansão ou mudança de fase, que modificam as seções de choque macroscópicas, e devido às alterações no movimento térmico dos núcleos levando a variação das seções de choque microscópicas, proveniente do efeito

Doppler.

Essas variações de reatividade são expressas em termos do Coeficiente de Reatividade de Temperatura, definido como a derivada da reatividade com respeito à temperatura, conforme:

$$\alpha_T \equiv \frac{\partial \rho}{\partial T} = \frac{\rho(T_2) - \rho(T_1)}{T_2 - T_1} \quad (8.1)$$

onde $\rho(T)$ expressa a reatividade na temperatura T e T é a temperatura do combustível e/ou do moderador.

O efeito da temperatura no combustível surge principalmente devido ao alargamento Doppler das ressonâncias de absorção de nêutrons e a mudança do espectro de energia do nêutron, durante a alteração da densidade do moderador. Como consequência do efeito Doppler, os picos de ressonância são alargados, e a absorção de nêutrons na região de ressonância aumenta pelo aumento na temperatura.

O coeficiente de reatividade de temperatura é utilizado para medir a variação sofrida pela reatividade, $\Delta\rho$, devido a uma variação da temperatura no meio analisado. Os balanços de reatividade na operação de criticalização são usados para avaliar os desvios existentes entre os valores de reatividade previstas, quando o projeto foi calculado, e os valores reais das reatividades, indicando quanto o reator está afastado de sua condição de criticalidade, ou seja, quando $k_{inf} = 1$. A reatividade $\rho(T)$ é definida por:

$$\rho(T) = \frac{k_{inf}(T) - 1}{k_{inf}(T)} \quad (8.2)$$

onde $k_{inf}(T)$ expressa o fator de multiplicação infinito em uma determinada temperatura T .

Se o fator de multiplicação de um reator cresce com o aumento da temperatura, ou seja, se o coeficiente de reatividade de temperatura for positivo, então um aumento de temperatura resultará em um aumento na reatividade. A densidade de nêutrons aumentará, assim como a taxa de fissão e por consequência a taxa de

geração de calor, aumentando ainda mais a temperatura do reator, logo aumentando continuamente a reatividade. Um reator que tenha um coeficiente de reatividade de temperatura positiva será instável.

Para um reator ser considerado estável, é necessário um coeficiente de reatividade de temperatura bem pequeno, tal que um estado estacionário possa ser mantido por meio de barras de controle. Sendo o coeficiente de reatividade de temperatura negativo, ou seja, se reatividade decresce com a temperatura, um aumento na temperatura do reator levará a uma diminuição na reatividade. A taxa de fissão, assim como a taxa de geração de calor diminui, diminuindo a temperatura, fazendo com que a reatividade decresça continuamente.

O coeficiente de reatividade de temperatura, em um reator térmico, pode ser separado em duas partes: Coeficiente de Temperatura Nuclear, determinado pelo efeito da seção de choque, e o Coeficiente de Densidade de Temperatura, devido às mudanças no volume e densidade do sistema.

O teste de parâmetro de projeto, utilizando o coeficiente de reatividade de temperatura do combustível, conforme EQ. 8.1, foi feito a partir do cálculo da reatividade, conforme EQ. 8.2, nas temperaturas do combustível de 500 e 600 K. As comparações mostradas na TAB. 8.3 e 8.4 apresentam os resultados obtidos a partir da simulação do código SCALE e a partir da parametrização por polinômios de Tchebyshev em um elemento combustível com veneno queimável, para o ciclo zero e para o ciclo três, respectivamente. Para o ciclo zero foi utilizada a expansão apresentada na EQ. 7.1 e para o ciclo três a expansão apresentada na EQ. 7.13.

TAB. 8.3 Coeficiente de reatividade de temperatura do combustível e comparação entre as reatividades obtidas a partir do código SCALE e pela expansão dos polinômios de Tchebyshev em função das temperaturas do combustível de $T_1=590$ K e $T_2=600$ K em um elemento combustível com veneno queimável, no ciclo zero.

Resultados	$k_{inf}(T_2)$	$k_{inf}(T_1)$	$\rho(T_2)$	$\rho(T_1)$	$\alpha(T)$
SCALE	0,908973	0,909168	-0,100142	-0,099907	-0,000024
Expansão	0,908771	0,909053	-0,100387	-0,100045	-0,000034
Desvio (%)	0,022	0,012	0,244	0,138	-

TAB. 8.4 Coeficiente de reatividade de temperatura do combustível e comparação entre as reatividades obtidas a partir do código SCALE e pela expansão dos polinômios de Tchebyshev em função das temperaturas do combustível de $T_1=590$ K e $T_2=600$ K em um elemento combustível com veneno queimável, no ciclo três.

Resultados	$k_{inf}(T_2)$	$k_{inf}(T_1)$	$\rho(T_2)$	$\rho(T_1)$	$\alpha(T)$
SCALE	0,758416	0,758240	-0,318538	-0,318844	-0,000031
Expansão	0,758307	0,758054	-0,318728	-0,319167	-0,000044
Desvio (%)	0,014	0,024	0,059	0,101	-

Os resultados apresentados nas TAB. 8.3 e 8.4 confirmam o quão preciso são os resultados oriundos das expansões polinomiais desenvolvidas nesta dissertação de mestrado, validando assim o método. Pode-se observar que os desvios dos resultados dos coeficientes de reatividade de temperatura do combustível são pequenos, explicado pela proximidade dos mesmos.

Por ser um parâmetro de projeto, os coeficientes de reatividade de temperatura do combustível representam uma boa base de comparação para este tipo de análise. Normalmente a literatura utiliza o pcm (partes por cem mil) como unidade para os coeficientes acima avaliados, e tendo o intervalo de aceitação compreendido entre -4 a -1 pcm/ $^{\circ}$ K. Os valores apresentados nas TAB. 8.3 e 8.4, em unidades de pcm estão dispostos na TAB. 8.5.

TAB. 8.5 Coeficiente de reatividade de temperatura do combustível em unidades de pcm / $^{\circ}$ K.

Resultados	Ciclo Zero	Ciclo Três
	$\alpha(T)$ pcm/ $^{\circ}$ K	$\alpha(T)$ pcm/ $^{\circ}$ K
SCALE	-2,35	-3,06
Expansão	-3,42	-4,39

8.4 CÁLCULO DO FATOR DE FISSÃO RÁPIDO

Outro parâmetro importante é o fator de fissão rápido $\epsilon(T)$, que é a relação entre o número total de nêutrons de fissão, de ambas as fissões rápida e térmica, com o número de nêutrons de fissão de nêutrons térmicos, ou seja:

$$\epsilon(T) \equiv \frac{\text{Número total de nêutrons de fissão (rápida e térmica)}}{\text{Número de nêutrons de fissão de fissão térmica}}, \quad (8.3)$$

podendo ser escrita em função das seções de choque macroscópicas de nu-fissão, conforme:

$$\epsilon(T) \equiv \frac{\nu\Sigma_f^R + \nu\Sigma_f^T}{\nu\Sigma_f^R} \quad (8.4)$$

Este fator considera que, embora a maioria das fissões seja induzida em material físsil por nêutrons térmicos, algumas fissões serão induzidas por nêutrons rápidos tanto em materiais físeis com materiais fissionáveis. O efeito do fator de fissão rápida deve ser levado em conta já que em um reator térmico há quantidades substanciais de isótopos fissionáveis como o ${}^{238}_{92}\text{U}$. O número de nêutrons que contribuem para a reação em cadeia, provenientes da fissão rápida do ${}^{238}_{92}\text{U}$, é uma pequena fração dos nêutrons oriundos das fissões térmicas. Acima de 1 MeV, ou seja, do limiar de fissão rápida, há um certo equilíbrio entre a fissão, os espalhamentos elásticos e inelásticos, a captura e a fuga do combustível para o moderador.

A fissão rápida fornece $\nu_f = 2,51$ novos nêutrons, um pouco mais que a fissão térmica. O fator de fissão rápida $\epsilon(T)$ geralmente é bastante próximo da unidade em um reator térmico com os valores típicos que variam entre $\epsilon = 1,03$ e $\epsilon = 1,15$.

A partir das seções de choque de nu-fissão, rápida e térmica, proveniente da simulação no código nuclear SCALE 6.1 para o elemento combustível com veneno queimado, no ciclo zero e três, e das seções de choque de nu-fissão, rápida e térmica, obtidos através da parametrização dos polinômios de Tchebyshev, criou-se a TAB. 8.6 para que possam ser comparados os valores do fator de fissão rápida resultantes de ambos os métodos, para as temperaturas de 590 K e 600 K, T_1 e T_2 , respectivamente. A expansão utilizada para o cálculo do fator de fissão rápida para o ciclo zero encontra-se disponibilizada na TAB. 7.1 e para o ciclo três a expansão está apresentada na TAB. 7.16.

TAB. 8.6 Comparação entre os resultados dos fatores de fissão rápida obtidos a partir do código SCALE e pela expansão dos polinômios de Tchebyshev em função das temperaturas de $T_1=590$ K e $T_2=600$ K em um elemento combustível com veneno queimável.

Resultados	Ciclo Zero		Ciclo Três	
	$\epsilon(T_2)$	$\epsilon(T_1)$	$\epsilon(T_2)$	$\epsilon(T_1)$
SCALE	1,060652	1,060644	1,048941	1,048944
Expansão	1,060646	1,060641	1,048935	1,048941
Desvio (%)	0,000537%	0,000263%	0,000546%	0,000263%

Os valores dos fatores de fissão rápida apresentados estão dentro do intervalo de aceitação estabelecido e os desvios são inferiores a 0,00055 %, validando o uso da parametrização desenvolvida para o cálculo das seções de choque macroscópicas.

8.5 COMPARAÇÃO ENTRE O MÉTODO DE PARAMETRIZAÇÃO POR POLINÔMIOS DE TCHEBYSHEV E POR POLINÔMIOS DE LAGRANGE

Os métodos de interpolação polinomial diferem, uns dos outros, quanto à técnica de determinação do polinômio interpolador. Os erros de arredondamento diferem em cada caso, pois as operações aritméticas são conduzidas de formas distintas, em cada método. A escolha da metodologia de parametrização foi precedida por uma análise de outros métodos de interpolação, dentre eles o método das diferenças finitas, método de Newton, ou chamado método das diferenças divididas, polinômios de Bernstein e polinômios de Lagrange. Entretanto, o método que apresentou melhores resultados foi à utilização dos polinômios de Tchebyshev, devido os mesmos apresentarem vantagens em relação a outras técnicas, destacando a propriedade de minimizar os erros, tornando-os uniformes, conforme foi citado no capítulo 3.

Utilizando os polinômios de Lagrange como base comparativa para verificar a eficiência e precisão dos resultados obtidos pelo método por polinômios de Tchebyshev, foi feita uma parametrização das seções de choque macroscópicas de um elemento combustível com veneno queimável, em função da temperatura do

combustível.

Os polinômios de Lagrange são polinômios de interpolação de um conjunto de pontos na forma de Lagrange, onde em sua definição, dado um conjunto de $k + 1$ pontos: $(x_0, y_0), \dots, (x_k, y_k)$ com todos os x_j distintos, o polinômio de interpolação de um conjunto de pontos na forma de Lagrange é a combinação linear dos polinômios da base de Lagrange, conforme:

$$L(x) = \sum_{j=0}^k y_j l_j(x), \quad (8.5)$$

com polinômios da base de Lagrange dados por:

$$l_j(x) = \prod_{i=0; i \neq j}^k \frac{x - x_i}{x_j - x_i} = \frac{x - x_0}{x_j - x_0} \dots \frac{x - x_{j-1}}{x_j - x_{j-1}} \frac{x - x_{j+1}}{x_j - x_{j+1}} \dots \frac{x - x_k}{x_j - x_k} \quad (8.6)$$

A análise utilizando o método de Lagrange e o método de Tchebyshev, em comparação com a simulação feita no código SCALE 6.1, a partir do elemento combustível com veneno queimável em função da temperatura do combustível de $T_F = 1248$ K, mantendo-se os demais parâmetros de referência apresentados na TAB. 3.1, é apresentada na TAB. 8.7. Nesta tabela, os desvios são referentes aos resultados obtidos pelo código computacional SCALE.

TAB. 8.7 – Análise do método de Tchebyshev e de Lagrange em comparação com os resultados obtidos a partir do código SCALE em função da temperatura do combustível de 1248 K em um elemento combustível com veneno queimável.

Seção de Choque	Grupos	SCALE	Tchebyshev	Desvio (%)	Lagrange	Desvio (%)
Fissão	1	0,00169	0,00169	0,00356	0,00168	0,18690
	2	0,03465	0,03465	0,00037	0,03468	0,09776
Total	1	0,53642	0,53642	0,00056	0,53509	0,24859
	2	1,26454	1,26455	0,00074	1,26454	0,00027
Espalhamento	1	0,52697	0,52697	0,00005	0,52695	0,00363
	2	1,15427	1,15428	0,00048	1,15534	0,09260
Absorção	1	0,00950	0,00950	0,02775	0,00924	2,75126
	2	0,11027	0,11027	0,00197	0,11046	0,17246
Captura	1	0,00781	0,00782	0,03452	0,00754	3,51951
	2	0,07562	0,07563	0,00270	0,07606	0,57861
Nu-Fissão	1	0,00467	0,00467	0,00350	0,00464	0,64743
	2	0,09610	0,09610	0,00035	0,09609	0,00970
Transporte	1	0,21721	0,21721	0,00047	0,21722	0,00468
	2	0,76735	0,76735	0,00056	0,76704	0,04032
Espalhamento 1-1	–	0,50813	0,50814	0,00038	0,50866	0,10447
Espalhamento 1-2	–	0,01884	0,01883	0,01191	0,01769	6,08129
Espalhamento 2-2	–	1,15427	1,15428	0,00048	1,15534	0,09260

Ao analisar os desvios apresentados pelo método de interpolação utilizando os polinômios de Lagrange, pode ser visto que não há uma uniformidade dos desvios, tendo pontos com aproximações boas, como para a seção de choque macroscópica total térmica com 0,00027 % de desvio, e outros pontos com aproximações ruins, como para a seção de choque macroscópica de espalhamento 1-2 com valor superior a 6 % de desvio.

Já analisando os resultados da parametrização por polinômios de Tchebyshev, verifica-se a uniformidade dos pontos e a aproximação dos valores obtidos no código SCALE, com desvios inferiores a 0,035 %, confirmando a escolha do método.

9 ANÁLISE FINAL E CONCLUSÃO

9.1 CONCLUSÕES E ANÁLISE FINAL

Este trabalho descreveu, por meio de polinômios de Tchebyshev, uma representação parametrizada das seções de choque macroscópicas de fissão, total, espalhamento total, espalhamento entre grupos, absorção, captura radioativa, nu-fissão e transporte, e do fator de multiplicação infinito. Avaliou-se o elemento combustível, com e sem veneno queimável, de um reator PWR, análogo a ANGRA II, em função de parâmetros nucleares, tais como, a temperatura do combustível, a temperatura e densidade do moderador, a concentração de boro solúvel, o enriquecimento do $^{235}_{92}\text{U}$, e considerando o burn-up para vários ciclos de queima. O método utilizado possibilita a realização de cálculos neutrônicos a poucos grupos de energia de forma prática, rápida, e sem o dispêndio de tempo de processamento, comum no uso dos códigos computacionais nucleares convencionais. Foi utilizado o código computacional nuclear SCALE 6.1 como ferramenta de cálculo para a geração das seções de choque homogeneizadas a 238 grupos de energia e posterior colapso em dois grupos de energia, um grupo rápido e um grupo térmico.

A biblioteca de funções de seções de choque e fator de multiplicação infinito parametrizada foi desenvolvida a partir do método de interpolação por polinômios de Tchebyshev, o qual minimiza o erro, uniformizando-o, ou seja, fazendo a incerteza ficar quase uniforme ao longo do intervalo de análise.

As equações parametrizadas do fator de multiplicação infinito, assim como das seções de choque, obtidos através do método estudado, para os dois casos exemplos, apresentaram uma boa descrição física do comportamento dos dados avaliados e uma ótima precisão, ao longo do intervalo de análise. A introdução da queima do combustível trouxe conclusões a respeito da influencia dos produtos de fissão e actínidos perante o comportamento das seções de choque e fator de multiplicação infinito examinados.

Testes foram realizados a fim de comprovar a eficiência do método. As comparações entre resultados das seções de choque provenientes da expansão polinomial e pelo uso do SCALE apresentaram excelente concordância, onde se obteve desvios menores que 0,08 %. Foram utilizados parâmetros de projeto como, o coeficiente de reatividade de temperatura e o fator de fissão rápido, comparando com os resultados obtidos do código SCALE com os das equações parametrizadas, obtendo desvios inferiores a 0,2 % e 0,00055 %, respectivamente. Por serem parâmetros de projeto eles representam uma boa base de comparação para este tipo de análise.

9.2 SUGESTÕES PARA FUTUROS PROJETOS

O método utilizado nesta dissertação de mestrado pode ser ampliado para outros tipos de reatores, como por exemplo, reatores rápidos, reatores de pequeno porte, modulares, reatores do tipo BWR, HTGR, etc.

Outras pesquisas utilizando a metodologia desenvolvida neste trabalho, e acrescentando, por exemplo, a “análise de sensibilidade” para refinar os resultados obtidos apresenta-se como possibilidade.

10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANGRA II – **Relatório Final de Análise de Segurança** – RFAS, Eletronuclear, Ver.1, Agosto 1999.

APOSTOL, T. M., **CALCULUS – Multi-Variable Calculus and Linear Algebra, With Applications to Differential Equations and Probability**, John Wiley & Sons, New York, 1969.

BARROSO, Dalton Ellery G.. **A Física dos Explosivos Nucleares**. 2ª ed. São Paulo: Livraria da Física, 2009. 439 p.

BOKOV P. M. **Automated Few-Group Cross-Section Parameterization Based on Quasi-Regression**, Annals of Nuclear Energy 36 (2009) 1215-1223.

BOTES D. and BOKOV P. M. Hierarchical, **Multilinear Representation of Few-Group Cross Sections on Sparse Grids**. International Conference on Mathematics and Computational Methods Applied to Nuclear Science and Engineering. Rio de Janeiro, RJ, Brazil, 2011.

BOKOV P. M. and BOTES D. **Pseudospectral Chebyshev Representation of Few-Group Cross Sections on Sparse Grids**. PHYSOR 2012: Advances in Reactor Physics Linking Research, Industry, and Education Knoxville, Tennessee, USA, 2012.

CASTRO, V. F. **A Burnup Credit Methodology for PWR Spent Fuel Storage Pool**. Universidad Politecnica de Valencia. Espanha, 2012.

CHADWICK, M. B., et al. ENDF/B-VII.1 **Nuclear Data for Science and Technology: Cross Sections, Covariances, Fission Products Yields and Decay Data**. Nuclear Data Sheets Vol. 112, Issue 12. Pages 2887-2996, 2011.

CHIHARA, T. S., **An Introduction to Orthogonal Polynomials, Mathematics and its Applications Series**, Gordonand Breach, New York, 1978.

CLENSHAW, C. W. and HAYES, J. G. **Curve and Surface Fitting**. J. Inst. Maths. Applics., 1, pp. 164-183, 1965.

Dados para cálculo do regime de Burn-up. Disponível em: <
<http://www.eletronuclear.gov.br/AEmpresa/CentralNuclear/InformaçõesAngra2.aspx>>. Eletronuclear. Acesso em 31/09/2014.

DUDERSTADT, James J.; HAMILTON, Louis J.. **Nuclear Reactor Analysis**. Nova York: John Wiley & Sons, Inc., 1976. 650 p.

FIEL, J. C. B. **Parametrização de Seções de Choque Macroscópicas para Reatores PWR**. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2013.

GLASSTONE, Samuel; SESONSKE, Alexander. **Nuclear Reactor Engineering: Reactor Design Basics**. 4ª ed. Volume 1. Nova York: Chapman & Hall, 1994. 486 p.

GLASSTONE, Samuel; SESONSKE, Alexander. **Nuclear Reactor Engineering: Reactor Systems Engineering**. 4ª ed. Volume 2. Nova York: Chapman & Hall, 1994. 852 p.

HAMMING, R. W., **Numerical Methods for Scientists and Engineers**, McGraw-Hill Book Company Inc., New York, 1962.

HAYES, J. G. **Curve Fitting by Polynomials in One Variable**. Numerical Approximation to Functions and Data, edited by J. G. Hayes. The Athlone Press, chapter 5, 1970.

HONECK, H. C.. ENDF/B: **Specification for an Evaluated Nuclear Data File for Reactor Applications**. U.S. Atomic Energy Commission. Washington, D.C., 1966.

KAPLAN, Irving. **Física Nuclear**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois S.A., 1978. 633 p.

KELLY, L. G., **Handbook of Numerical Methods and Applications**, Addison-Wesley Publishing Company, Massachusetts, 1967.

KROGH, F. T., **Efficient Algorithms for Polynomial Interpolation and Numerical Differentiation**. Math. Comput., 24, pp. 185–190, 1970.

LAMARSH, John R.. **Introduction to Nuclear Reactor Theory**. Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company, 1966. 572 p.

LEPPÄNEN, J.. **Development of a New Monte Carlo Reactor Physics Code**. Helsinki University of Technology, Finland, 2007. 228 p.

MASON, J. C. and HANDSCOMB, D. C. **Chebyshev Polynomials**, Chapman & Hall/CRC, Florida, 2003.

MCNP – A General Monte Carlo, N-Particle Transport Code, version 5, MCNP, MCNP5, and “MCNP Version 5” are trademarks of the Regents of the University of California, Los Alamos National Laboratory.

Nuclear Data Services. International Atomic Energy Agency. Disponível em: <
<https://www-nds.iaea.org/>>. Acesso em: 21/11/2014

PRINSLOO R. H., BOKOV P. M., STANDER G., BOTES D. **An Automated Cross Section Parameterization Method for MTR Application.** American Nuclear Society – ANS: 2009 International Conference on Advances in Mathematics, Computational Methods, and Reactor Physics; Saratoga Springs, NY, 2009.

RADELUSCU G., GAULD I. C., ILAS G., and WAGNER J. C. **An Approach for Validating Actinide and Fission Product Burnup Credit Criticality Safety Analyses: Isotopic Composition Predictions,** NUREG/CR-7108 (ORNL/TM-2011/509), Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, 2011.

RIVLIN, T. J., **Chebyshev Polynomials,** John Wiley & Sons, New York, 1990.

Scale: A Comprehensive Modeling and Simulation Suite for Nuclear Safety Analysis and Design, ORNL/TM-2005/39, Version 6.1, June 2011. Available from Radiation Safety Information Computational Center at Oak Ridge National Laboratory as CCC-785.

SCHWERER, O. **Nuclear Data Libraries and Services Provided by the IAEA.** Nuclear Data Section, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, 2001.

The Westinghouse Pressurized Water Reactor Nuclear Power Plant, Westinghouse Electric Corporation – Water Reactor Divisions, 1984.

ZIMIN V. G. and SEMENOV A. A. **Building Neutron Cross Section Dependencies for Few-Group Reactor Calculations Using Stepwise Regression.** Annals of Nuclear Energy Vol. 32, issue 1, January 2005, pg. 119-136.

11 APÊNDICES

11.1 PROGRAMA EM FORTRAN PARA CÁLCULO DOS COEFICIENTES DE TCHEBYSHEV

Neste apêndice, é apresentado o programa em linguagem FORTRAN para a determinação dos coeficientes de Tchebyshev. Este programa utiliza como dados de entrada os parâmetros de estado selecionados, tais como a temperatura do combustível, a temperatura e densidade do moderador, a concentração de boro solúvel e o enriquecimento de $^{235}_{92}\text{U}$, e as respectivas seções de choque, tais como a seção de choque de fissão, de espalhamento total, espalhamento nos grupos de energia, absorção, captura radioativa, nu-fissão, total e transporte, assim como o fator de multiplicação infinito. Ele utiliza a sub-rotina E01AEF da biblioteca NAG (*Numerical Algorithms Group*) para a construção de uma representação de polinômios de Tchebyshev de um conjunto de dados.

```
.....  
C  CALCULO DOS COEFICIENTES DE TCHEBYSHEV  
.....
```

```
C  .. LOCAL SCALARS ..  
    REAL XMAX, XMIN  
    INTEGER I, IFAIL, IM1, IP1, IPMAX, IRES, ITEMP, IY, J, JM1,  
    * M, N, NIN, NOUT  
C  .. LOCAL ARRAYS ..  
    REAL A(12), TITLE(7), WRK(97), X(6), Y(6)  
    INTEGER IP(6), IWRK(14)  
C  .. SUBROUTINE REFERENCES ..  
C  E01AEF  
C  ..  
    OPEN(UNIT=5,FILE='CHEB.DAT',STATUS='UNKNOWN')  
    OPEN(UNIT=6,FILE='CHEB.OUT',STATUS='UNKNOWN')  
    READ (5,99999) TITLE  
    WRITE (6,99998) (TITLE(I),I=1,6)
```

```

20 READ (5,99997) M, XMIN, XMAX
   IF (M.LE.0) STOP
   N = 0
   IPMAX = 0
   DO 40 I=1,M
     N = N + 1
     READ (5,99997) IP(I), X(I), Y(N)
     IPMAX = MAX0(IPMAX,IP(I))
     IF(IP(I).EQ.0) GO TO 40
     ITEMP = N + 1
     N = N + IP(I)
     READ (5,99996) (Y(J),J=ITEMP,N)
40 CONTINUE
   IFAIL = 1
   CALL E01AEF(M, XMIN, XMAX, X, Y, IP, N, -1, -1, A, WRK, 97,
* IWRK, 14, IFAIL)
   IF (IFAIL.NE.0 .AND. IFAIL.LT.4) GO TO 120
   WRITE (6,99995) N
   WRITE (6,99993)
   DO 60 I=1,N
     IM1 = I - 1
     WRITE (6,99994) IM1, A(I)
60 CONTINUE
   WRITE (6,99992)
   IY = 0
   IRES = IPMAX + 1
   DO 100 I=1,M
     IP1 = IP(I) + 1
     DO 80 J=1,IP1
       IY = IY + 1
       IRES = IRES + 1
       JM1 = J - 1

```

```

      IF (JM1.NE.0) WRITE (6,99991) JM1, Y(IY), WRK(IRES)
      IF (JM1.EQ.0) WRITE (6,99990) X(I), Y(IY), WRK(IRES)

80  CONTINUE
100 CONTINUE
120 IF (IFAIL.NE.0) WRITE (6,99989) IFAIL
      GO TO 20

99999 FORMAT (6A4, 1A3)
99998 FORMAT (1H , 5A4, 1A3, 7HRESULTS/1X)
99997 FORMAT (I5, 2E15.8)
99996 FORMAT (3E15.8)
99995 FORMAT (43H TOTAL NUMBER OF INTERPOLATING CONDITIONS =, I4/)
99994 FORMAT (1H , I4,6X E15.8)
99993 FORMAT (25H INTERPOLATING POLYNOMIAL/20H I CHEBYSHEV CO
      * 16HEFFICIENT A(I+1)/)
99992 FORMAT (//,49H      X      R R-TH DERIVATIVE RESIDUAL/)
99991 FORMAT (1H , 15X, I4, F12.5, 1PE17.2)
99990 FORMAT (1X , E15.5, 4H  0, F12.1, 1PE17.2)
99989 FORMAT (//,26H0E01AEF EXITS WITH IFAIL =, I2, 6H ****)

      END

```

.....

11.2 ESTRUCTURA DOS GRUPOS DE ENERGIA

Grupo de Energia (n°)	Limite de Energia (eV)	Grupo de Energia (n°)	Limite de Energia (eV)
1	2,00E+07	121	2,00E+01
2	1,73E+07	122	1,90E+01
3	1,57E+07	123	1,85E+01
4	1,46E+07	124	1,70E+01
5	1,38E+07	125	1,60E+01
6	1,28E+07	126	1,51E+01
7	1,00E+07	127	1,44E+01
8	8,19E+06	128	1,38E+01
9	6,43E+06	129	1,29E+01
10	4,80E+06	130	1,19E+01
11	4,30E+06	131	1,15E+01
12	3,00E+06	132	1,00E+01
13	2,48E+06	133	9,10E+00
14	2,35E+06	134	8,10E+00
15	1,85E+06	135	7,15E+00
16	1,50E+06	136	7,00E+00
17	1,40E+06	137	6,75E+00
18	1,36E+06	138	6,50E+00
19	1,32E+06	139	6,25E+00
20	1,25E+06	140	6,00E+00
21	1,20E+06	141	5,40E+00
22	1,10E+06	142	5,00E+00
23	1,01E+06	143	4,75E+00
24	9,20E+05	144	4,00E+00
25	9,00E+05	145	3,73E+00
26	8,75E+05	146	3,50E+00
27	8,61E+05	147	3,15E+00
28	8,20E+05	148	3,05E+00
29	7,50E+05	149	3,00E+00
30	6,79E+05	150	2,97E+00
31	6,70E+05	151	2,87E+00
32	6,00E+05	152	2,77E+00
33	5,73E+05	153	2,67E+00
34	5,50E+05	154	2,57E+00
35	5,00E+05	155	2,47E+00
36	4,70E+05	156	2,38E+00

37	4,40E+05	157	2,30E+00
38	4,20E+05	158	2,21E+00
39	4,00E+05	159	2,12E+00
40	3,30E+05	160	2,00E+00
41	2,70E+05	161	1,94E+00
42	2,00E+05	162	1,86E+00
43	1,50E+05	163	1,77E+00
44	1,28E+05	164	1,68E+00
45	1,00E+05	165	1,59E+00
46	8,50E+04	166	1,50E+00
47	8,20E+04	167	1,45E+00
48	7,50E+04	168	1,40E+00
49	7,30E+04	169	1,35E+00
50	6,00E+04	170	1,30E+00
51	5,20E+04	171	1,25E+00
52	5,00E+04	172	1,22E+00
53	4,50E+04	173	1,20E+00
54	3,00E+04	174	1,17E+00
55	2,50E+04	175	1,15E+00
56	1,70E+04	176	1,14E+00
57	1,30E+04	177	1,13E+00
58	9,50E+03	178	1,12E+00
59	8,03E+03	179	1,11E+00
60	6,00E+03	180	1,10E+00
61	3,90E+03	181	1,09E+00
62	3,74E+03	182	1,08E+00
63	3,00E+03	183	1,07E+00
64	2,58E+03	184	1,06E+00
65	2,29E+03	185	1,05E+00
66	2,20E+03	186	1,04E+00
67	1,80E+03	187	1,03E+00
68	1,55E+03	188	1,02E+00
69	1,50E+03	189	1,01E+00
70	1,15E+03	190	1,00E+00
71	9,50E+02	191	9,75E-01
72	6,83E+02	192	9,50E-01
73	6,70E+02	193	9,25E-01
74	5,50E+02	194	9,00E-01
75	3,05E+02	195	8,50E-01

76	2,85E+02	196	8,00E-01
77	2,40E+02	197	7,50E-01
78	2,10E+02	198	7,00E-01
79	2,08E+02	199	6,50E-01
80	1,93E+02	200	6,25E-01
81	1,86E+02	201	6,00E-01
82	1,22E+02	202	5,50E-01
83	1,19E+02	203	5,00E-01
84	1,15E+02	204	4,50E-01
85	1,08E+02	205	4,00E-01
86	1,00E+02	206	3,75E-01
87	9,00E+01	207	3,50E-01
88	8,20E+01	208	3,25E-01
89	8,00E+01	209	3,00E-01
90	7,60E+01	210	2,75E-01
91	7,20E+01	211	2,50E-01
92	6,75E+01	212	2,25E-01
93	6,50E+01	213	2,00E-01
94	6,10E+01	214	1,75E-01
95	5,90E+01	215	1,50E-01
96	5,34E+01	216	1,25E-01
97	5,20E+01	217	1,00E-01
98	5,06E+01	218	9,00E-02
99	4,92E+01	219	8,00E-02
100	4,83E+01	220	7,00E-02
101	4,70E+01	221	6,00E-02
102	4,52E+01	222	5,00E-02
103	4,40E+01	223	4,00E-02
104	4,24E+01	224	3,00E-02
105	4,10E+01	225	2,53E-02
106	3,96E+01	226	1,00E-02
107	3,91E+01	227	7,50E-03
108	3,80E+01	228	5,00E-03
109	3,70E+01	229	4,00E-03
110	3,55E+01	230	3,00E-03
111	3,46E+01	231	2,50E-03
112	3,38E+01	232	2,00E-03
113	3,33E+01	233	1,50E-03
114	3,18E+01	234	1,20E-03

115	3,13E+01	235	1,00E-03
116	3,00E+01	236	7,50E-04
117	2,75E+01	237	5,00E-04
118	2,50E+01	238	1,00E-04
119	2,25E+01	239	1,00E-05
120	2,10E+01		

11.3 GRÁFICOS COMPLEMENTARES PARA O ELEMENTO COMBUSTÍVEL SEM VENENO QUEIMÁVEL

Neste apêndice serão disponibilizados os gráficos do comportamento das seções de choque complementares, em função dos parâmetros de estado, citados na tabela 3.1, do capítulo 3. Este apêndice foi dividido em subcapítulos conforme o ciclo de queima do combustível e conforme o parâmetro que está sendo variado.

11.3.1 CICLO ZERO

11.3.1.1 PARAMETRIZAÇÃO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DO COMBUSTÍVEL

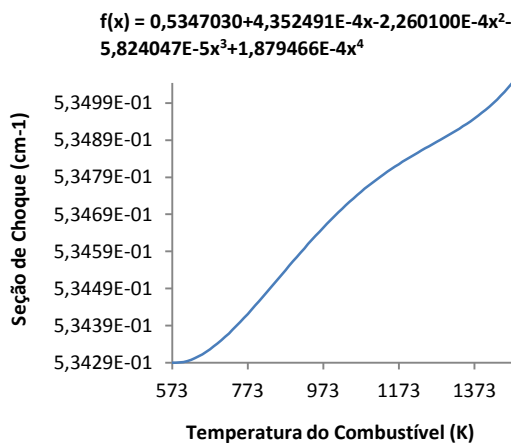


FIG. 11.1 Seção de choque total do grupo rápido.

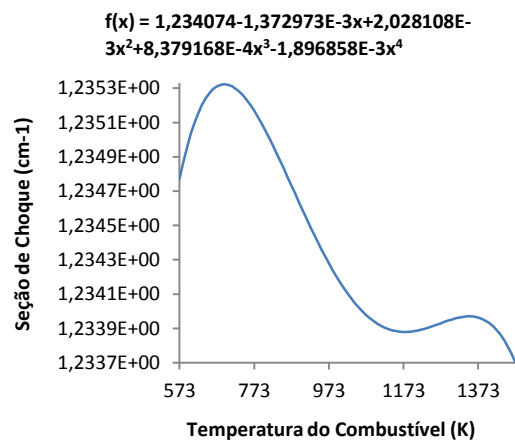


FIG. 11.2 Seção de choque total do grupo térmico.

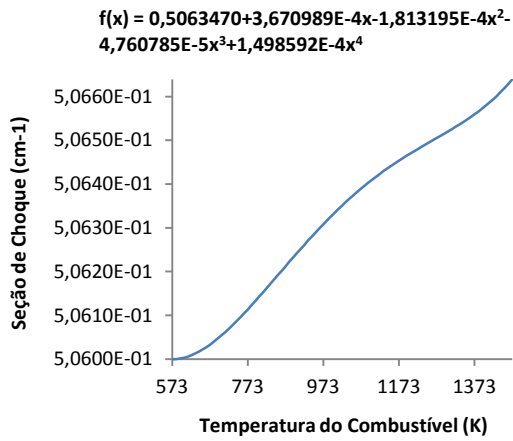


FIG. 11.3 Seção de choque de espalhamento 1-1.

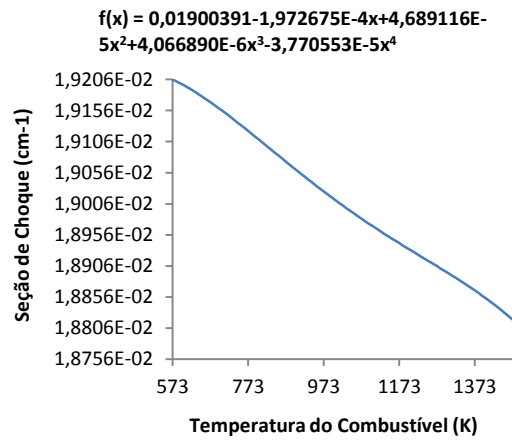


FIG. 11.4 Seção de choque de espalhamento 1-2.

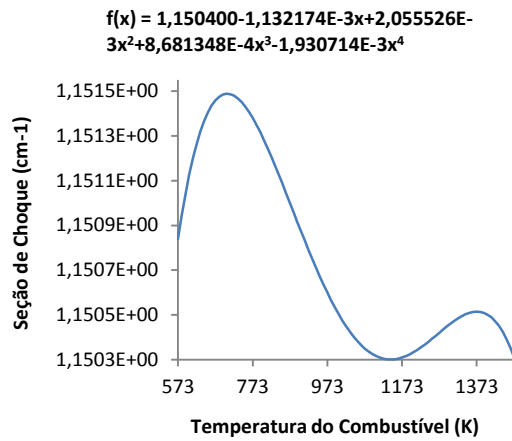


FIG. 11.5 Seção de choque de espalhamento 2-2.

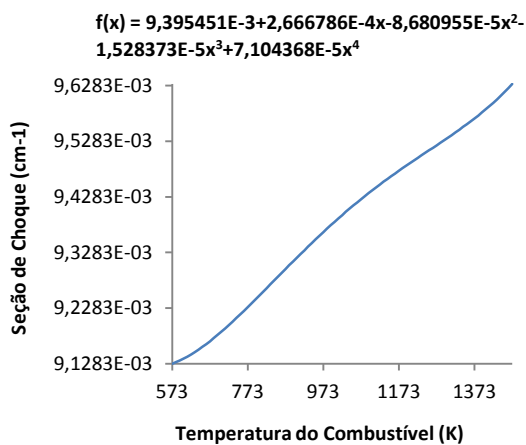


FIG. 11.6 Seção de choque de absorção rápida.

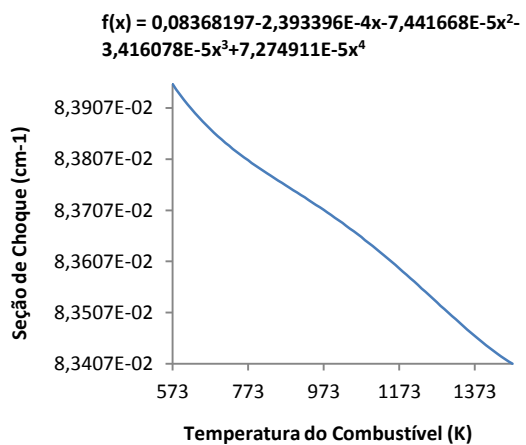


FIG. 11.7 Seção de choque de absorção térmica.

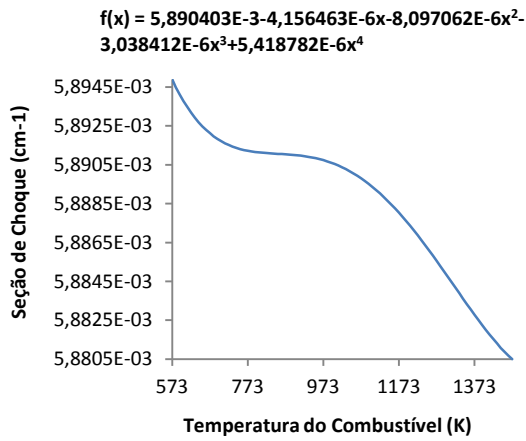


FIG. 11.8 Seção de choque de nu-fissão rápido.

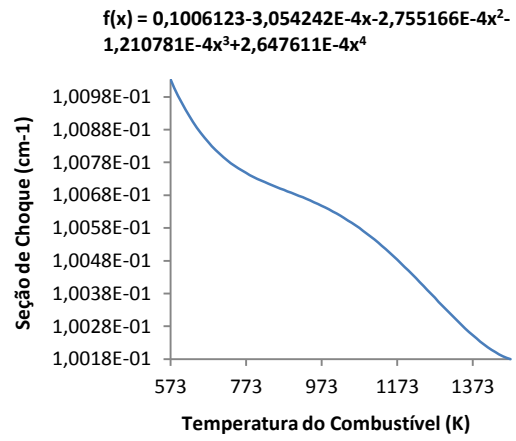


FIG. 11.9 Seção de choque de nu-fissão térmico.

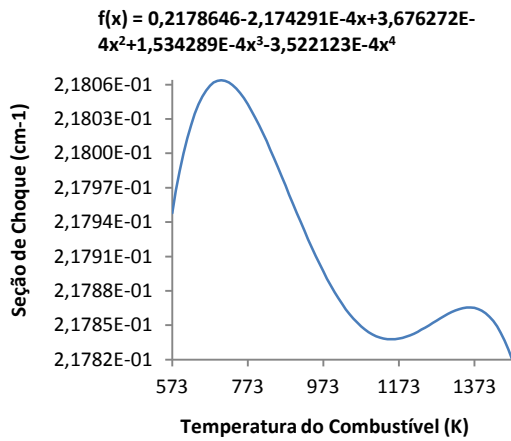


FIG. 11.10 Seção de choque de transporte rápido.

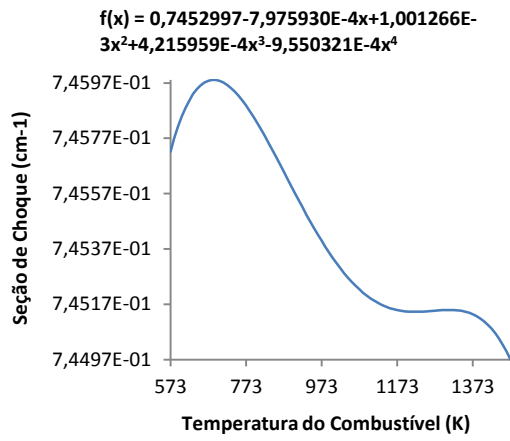


FIG. 11.11 Seção de choque de transporte térmico.

11.3.1.2 PARAMETRIZAÇÃO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA E DENSIDADE DO MODERADOR

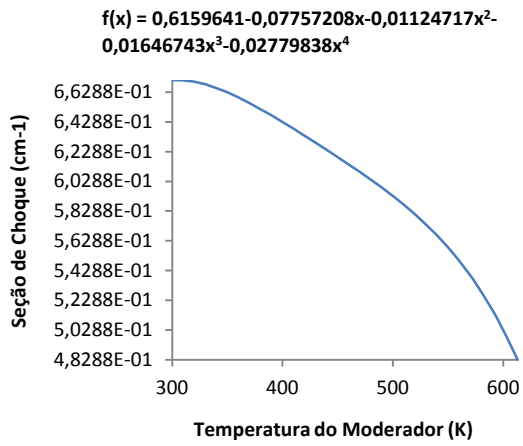


FIG. 11.12 Seção de choque total rápido.

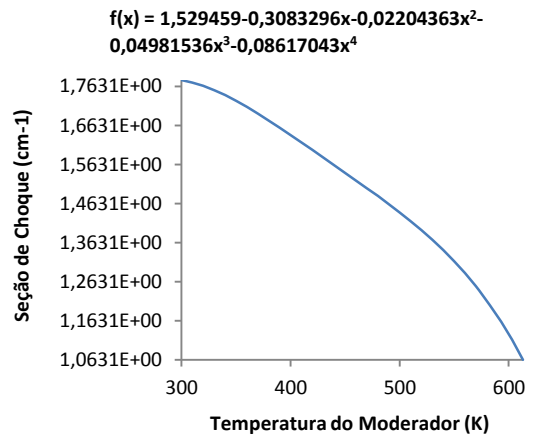


FIG. 11.13 Seção de choque total do grupo térmico.

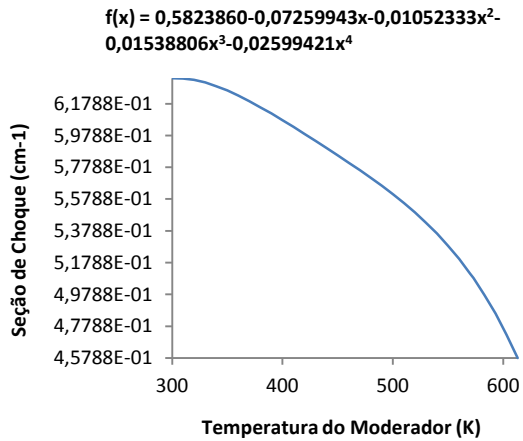


FIG. 11.14 Seção de choque de espalhamento 1-1.

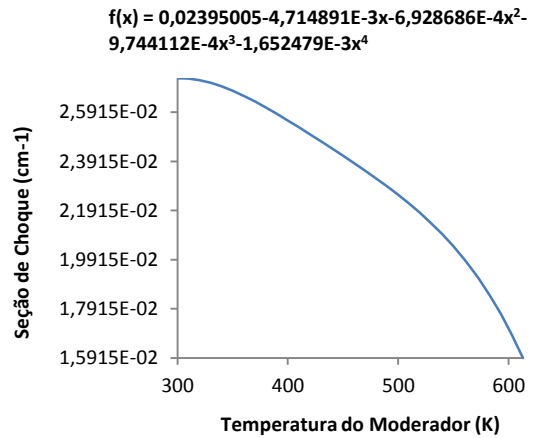


FIG. 11.15 Seção de choque de espalhamento 1-2.

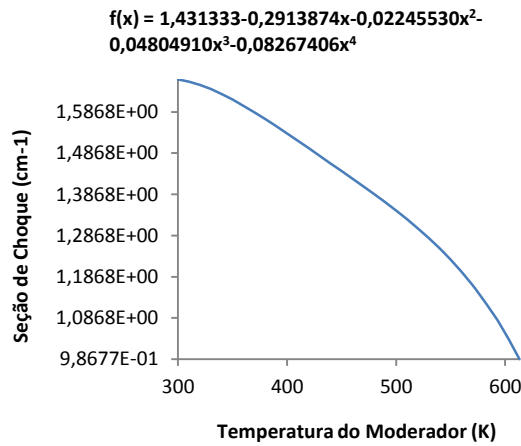


FIG. 11.16 Seção de choque de espalhamento 2-2.

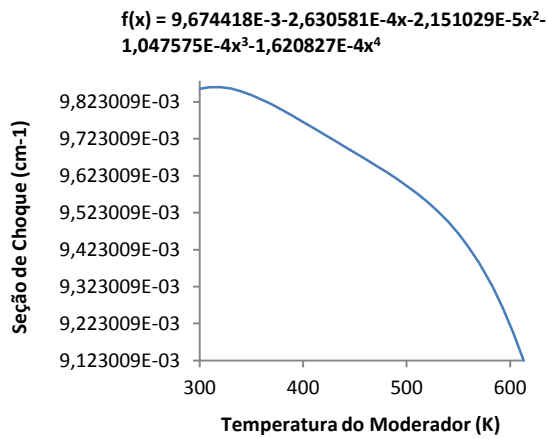


FIG. 11.17 Seção de choque de absorção rápida.

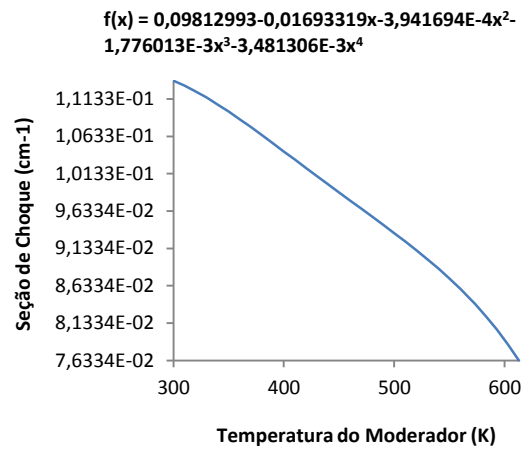


FIG. 11.18 Seção de choque de absorção térmica.

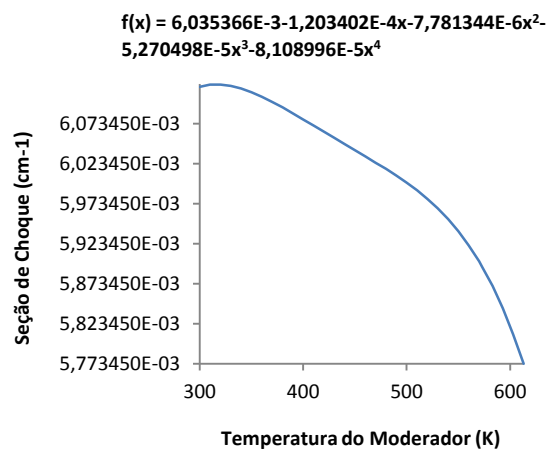


FIG. 11.19 Seção de choque de nu-fissão rápido.

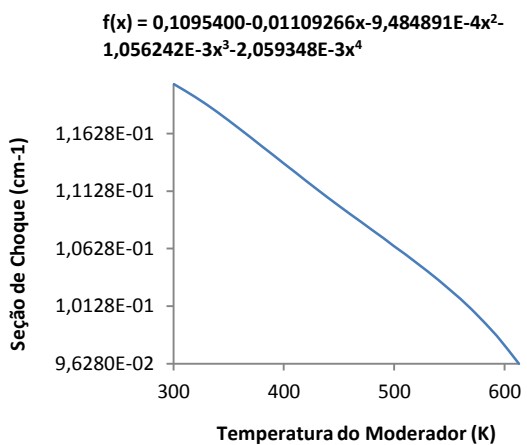


FIG. 11.20 Seção de choque de nu-fissão térmico.

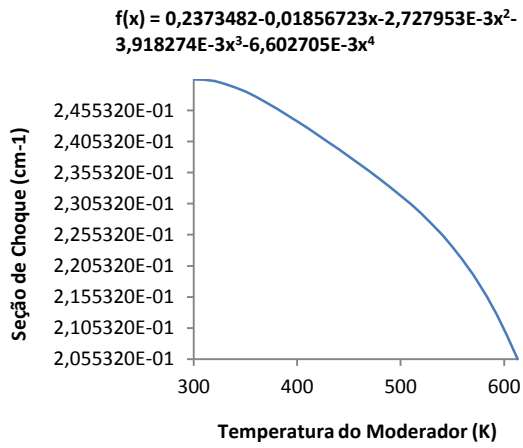


FIG. 11.21 Seção de choque de transporte rápido.

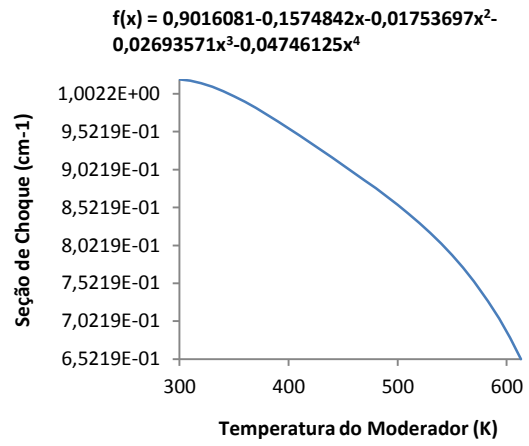


FIG. 11.22 Seção de choque de transporte térmico.

11.3.1.3 PARAMETRIZAÇÃO EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE BORO SOLÚVEL

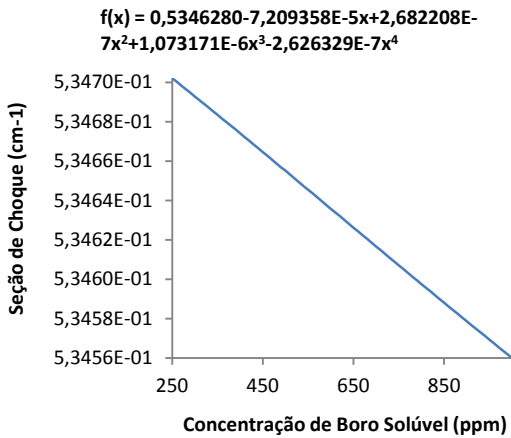


FIG. 11.23 Seção de choque total rápido.

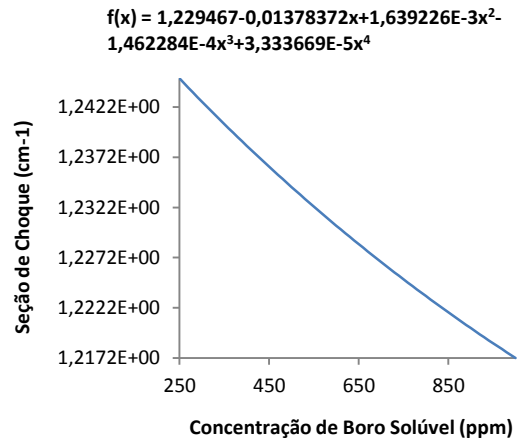


FIG. 11.24 Seção de choque total do grupo térmico.

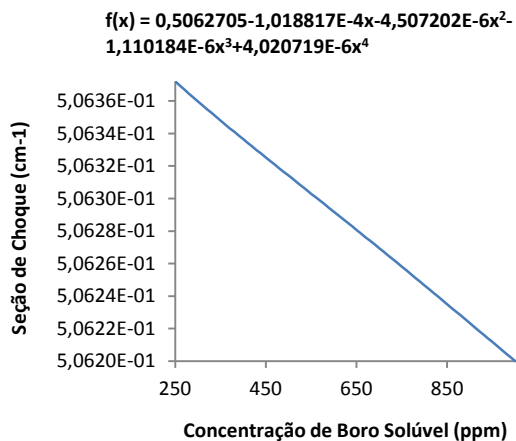


FIG. 11.25 Seção de choque de espalhamento 1-1.

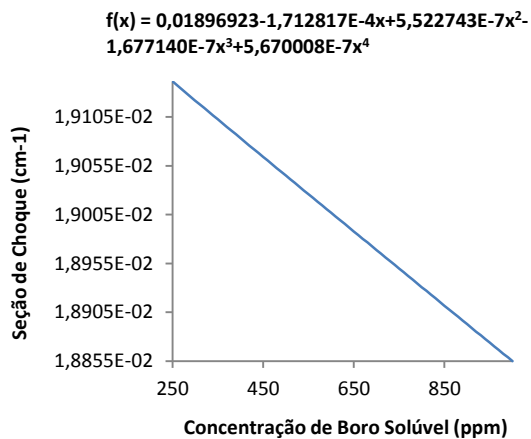


FIG. 11.26 Seção de choque de espalhamento 1-2.

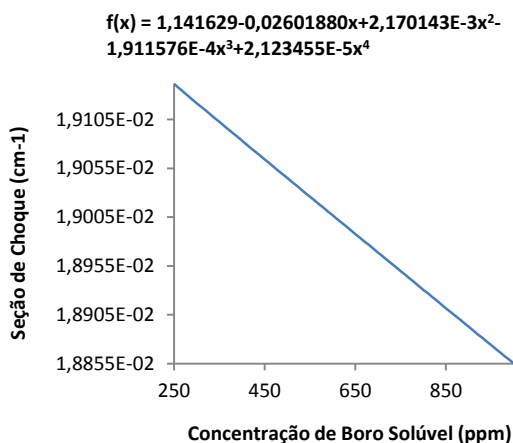


FIG. 11.27 Seção de choque de espalhamento 2-2.

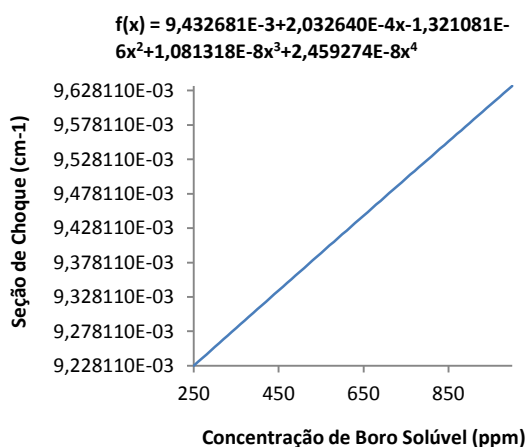


FIG. 11.28 Seção de choque de absorção rápida.

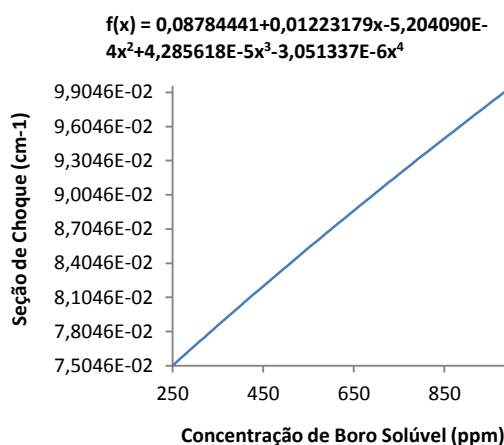


FIG. 11.29 Seção de choque de absorção térmica.

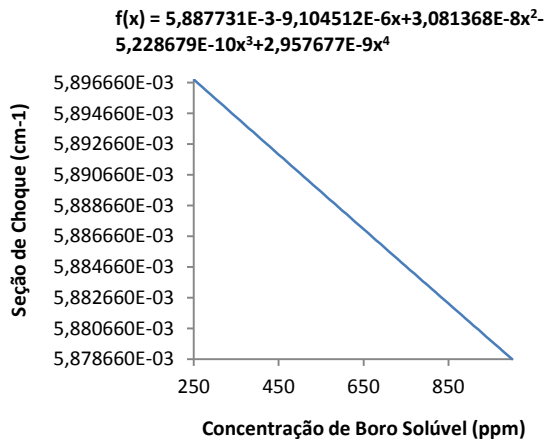


FIG. 11.30 Seção de choque de nu-fissão rápido.

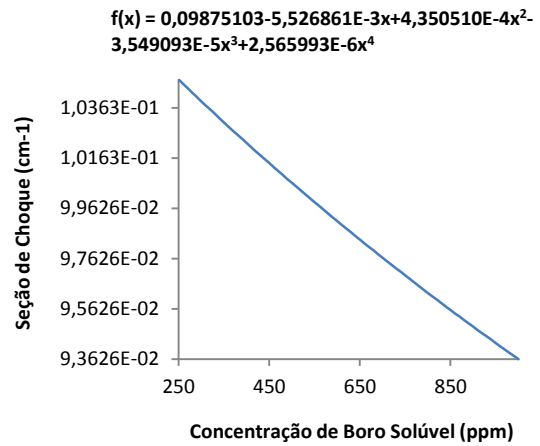


FIG. 11.31 Seção de choque de nu-fissão térmico.

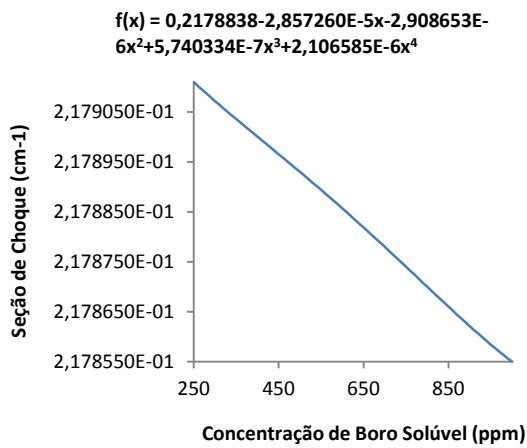


FIG. 11.32 Seção de choque de transporte rápido.

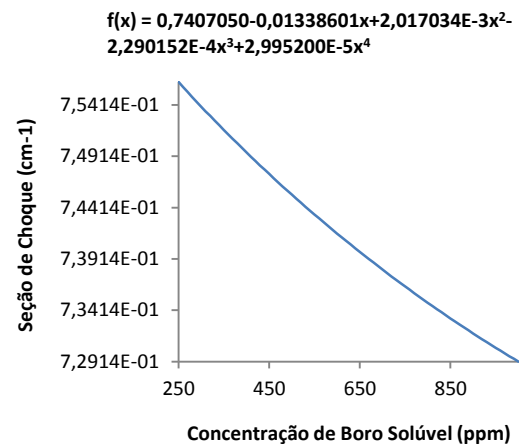


FIG. 11.33 Seção de choque de transporte térmico.

11.3.1.4 PARAMETRIZAÇÃO EM FUNÇÃO DO ENRIQUECIMENTO DE $^{235}_{92}\text{U}$

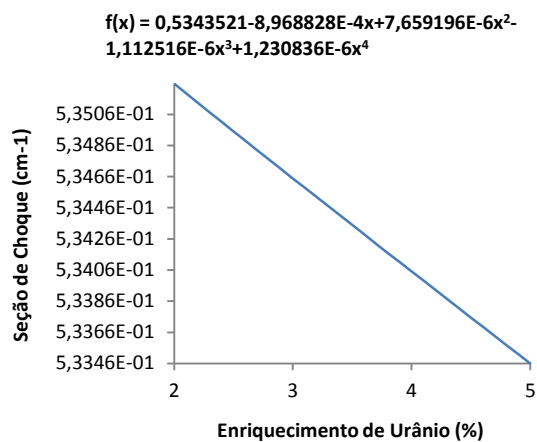


FIG. 11.34 Seção de choque total rápido.

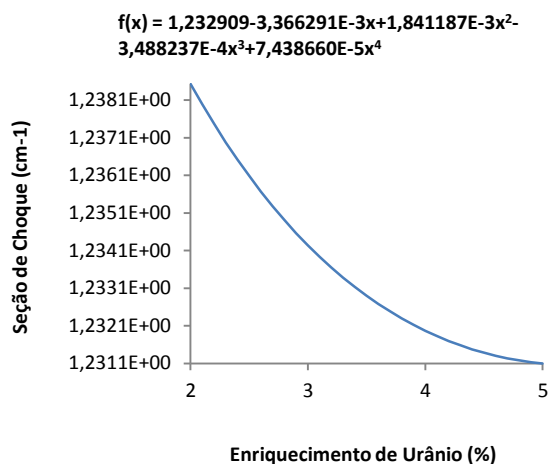


FIG. 11.35 Seção de choque total do grupo térmico.

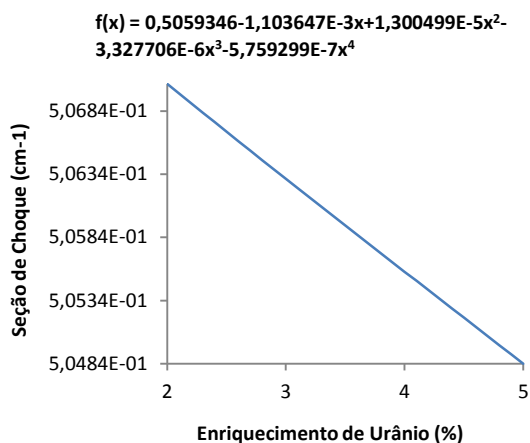


FIG. 11.36 Seção de choque de espalhamento 1-1.

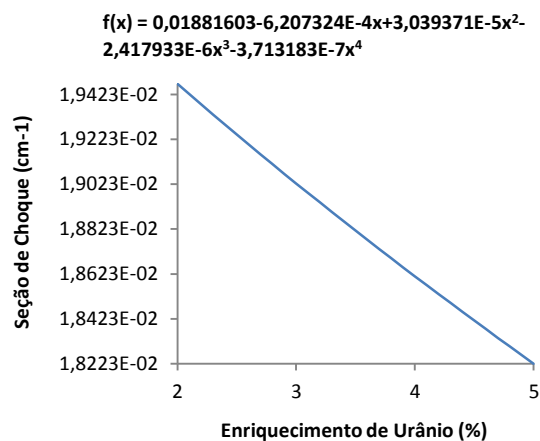


FIG. 11.37 Seção de choque de espalhamento 1-2.

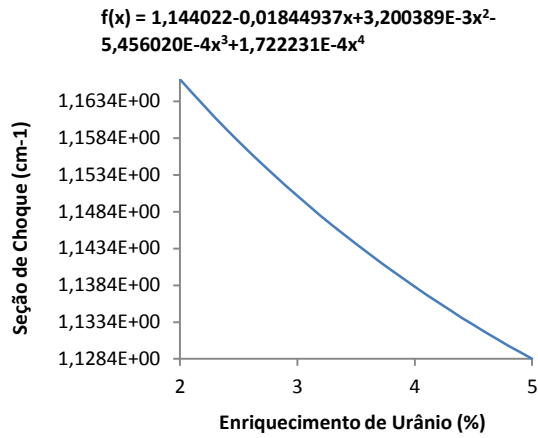


FIG. 11.38 Seção de choque de espalhamento 2-2.

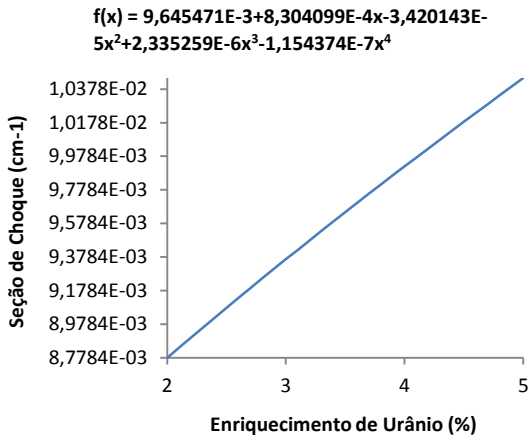


FIG. 11.39 Seção de choque de absorção rápida.

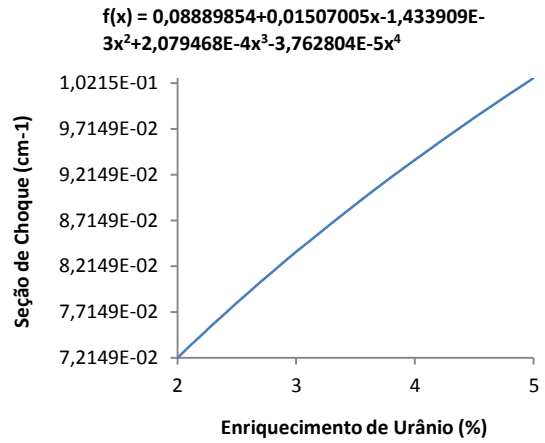


FIG. 11.40 Seção de choque de absorção térmica.

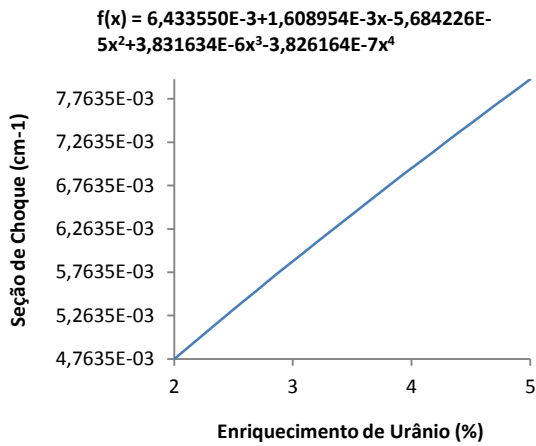


FIG. 11.41 Seção de choque de nu-fissão rápido.

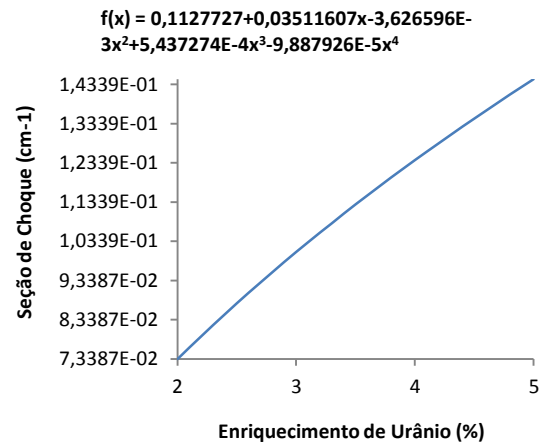


FIG. 11.42 Seção de choque de nu-fissão térmico.

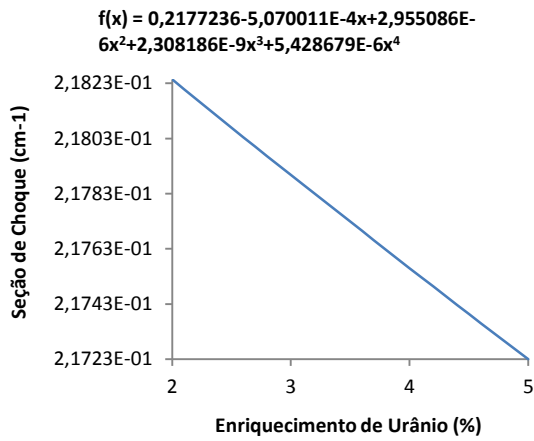


FIG. 11.43 Seção de choque de transporte rápido.

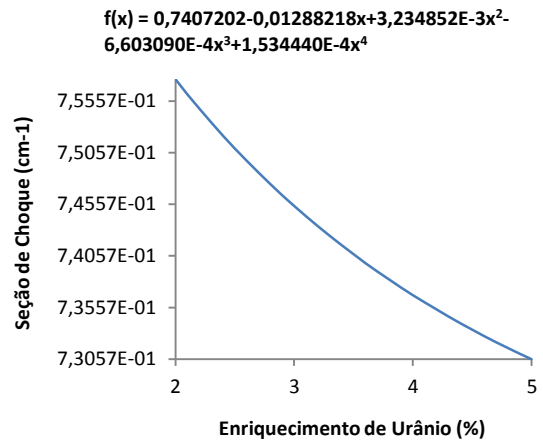


FIG. 11.44 Seção de choque de transporte térmico.

11.3.2 CICLO 1

11.3.2.1 PARAMETRIZAÇÃO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DO COMBUSTÍVEL

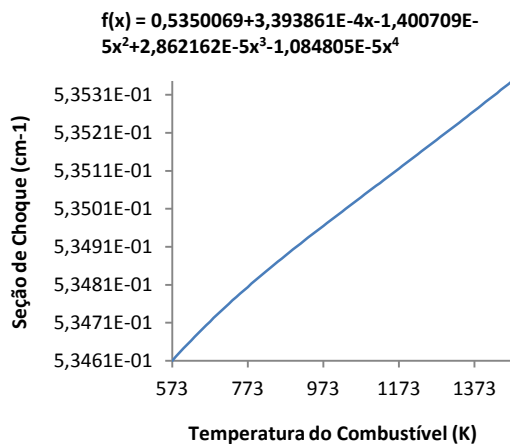


FIG. 11.45 Seção de choque total do grupo rápido.

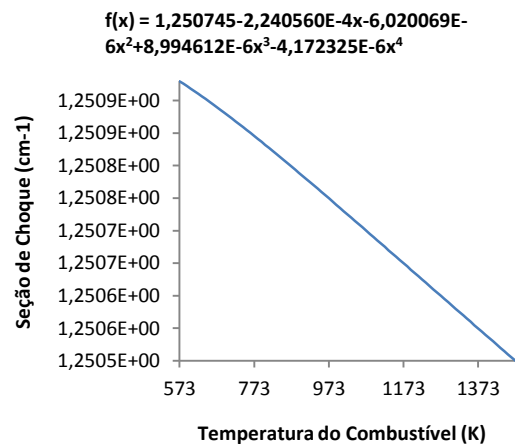


FIG. 11.46 Seção de choque total do grupo térmico.

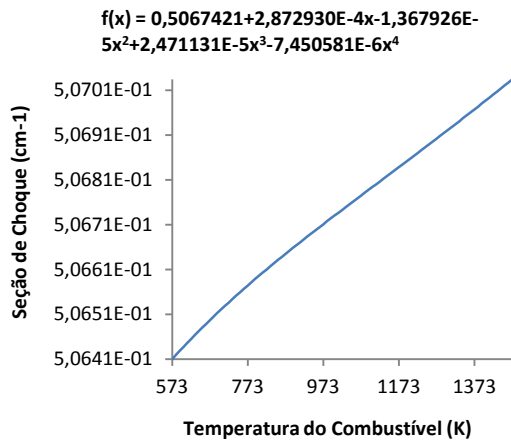


FIG. 11.47 Seção de choque de espalhamento 1-1.

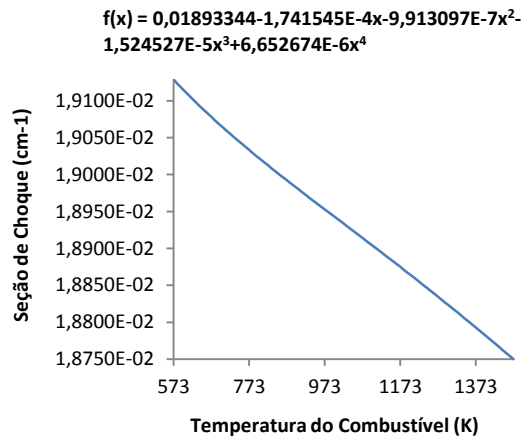


FIG. 11.48 Seção de choque de espalhamento 1-2.

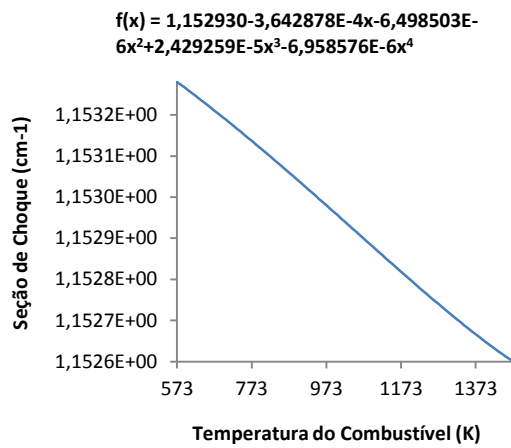


FIG. 11.49 Seção de choque de espalhamento 2-2.

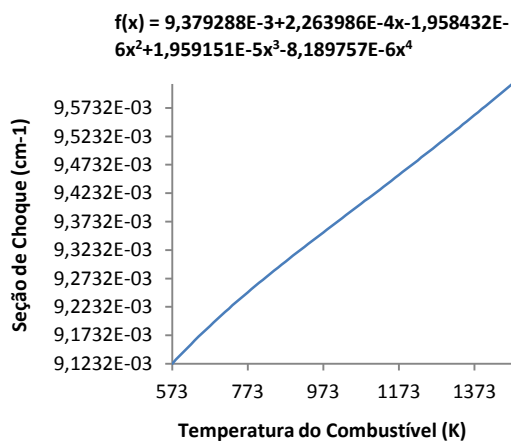


FIG. 11.50 Seção de choque de absorção rápida.

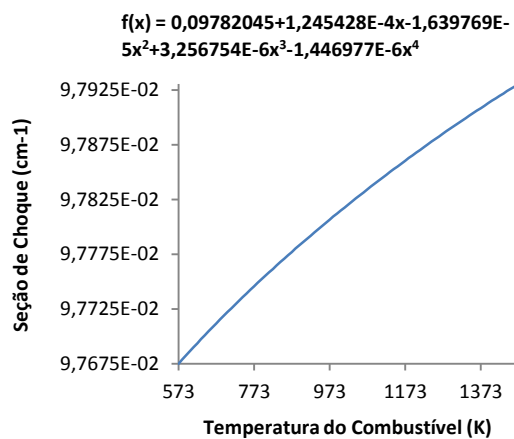


FIG. 11.51 Seção de choque de absorção térmica.

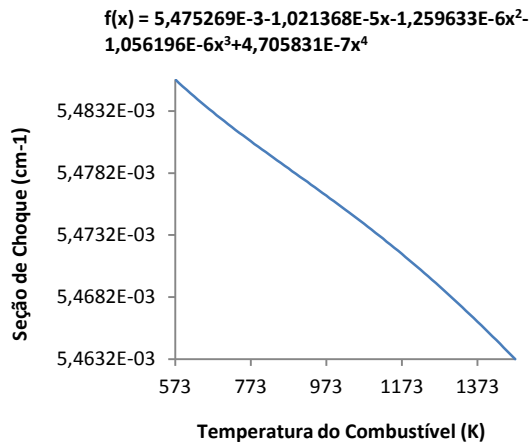


FIG. 11.52 Seção de choque de nu-fissão rápido.

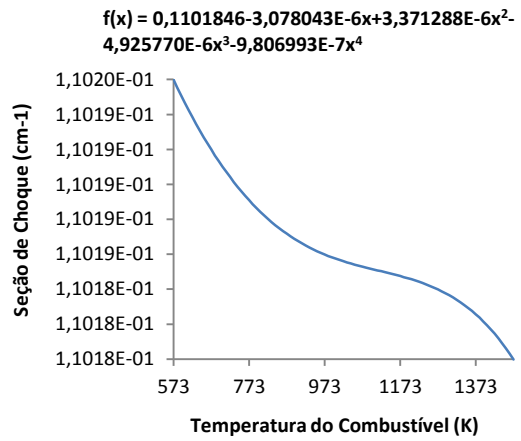


FIG. 11.53 Seção de choque de nu-fissão térmico.

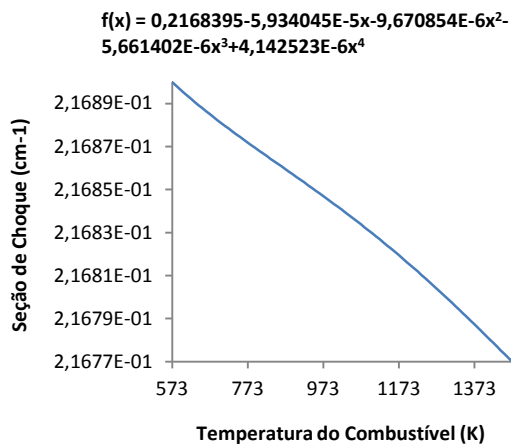


FIG. 11.54 Seção de choque de transporte rápido.

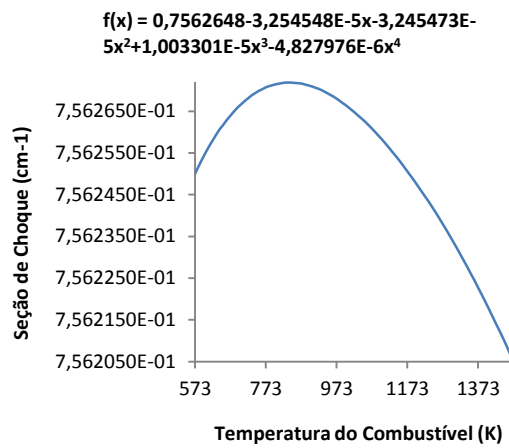


FIG. 11.55 Seção de choque de transporte térmico.

11.3.2.2 PARAMETRIZAÇÃO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA E DENSIDADE DO MODERADOR

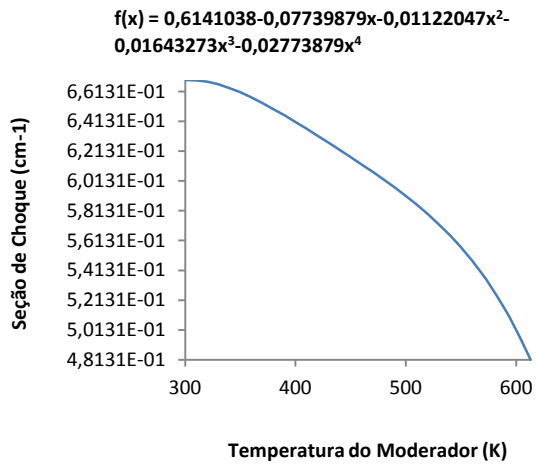


FIG. 11.56 Seção de choque total rápido.

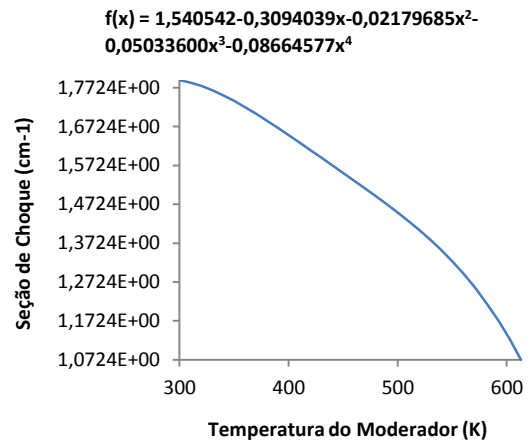


FIG. 11.57 Seção de choque total do grupo térmico.

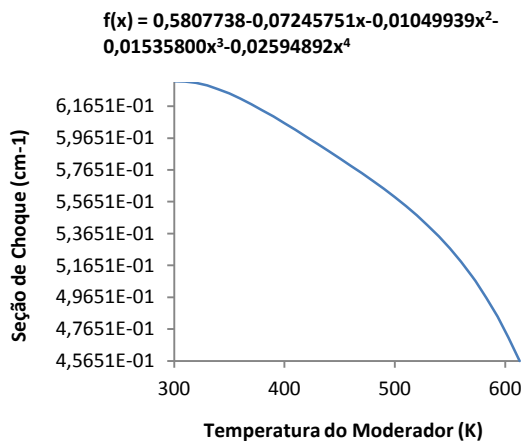


FIG. 11.58 Seção de choque de espalhamento 1-1.

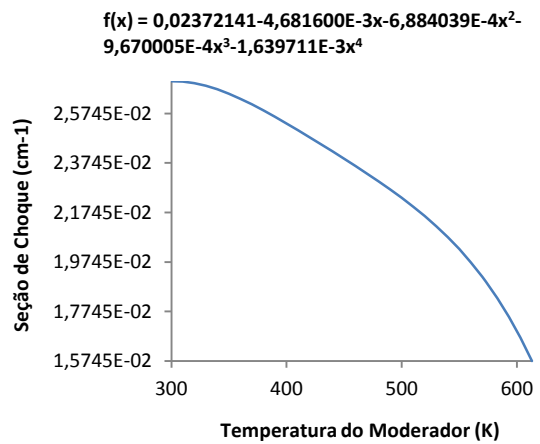


FIG. 11.59 Seção de choque de espalhamento 1-2.

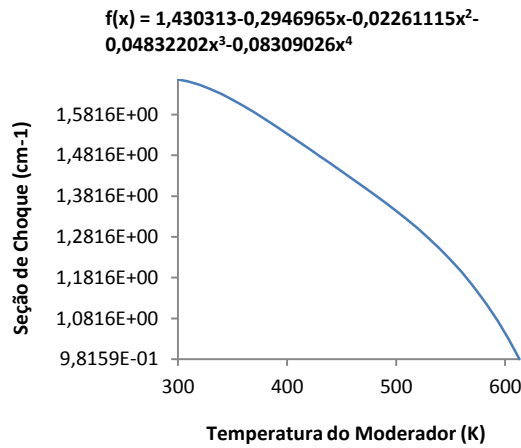


FIG. 11.60 Seção de choque de espalhamento 2-2.

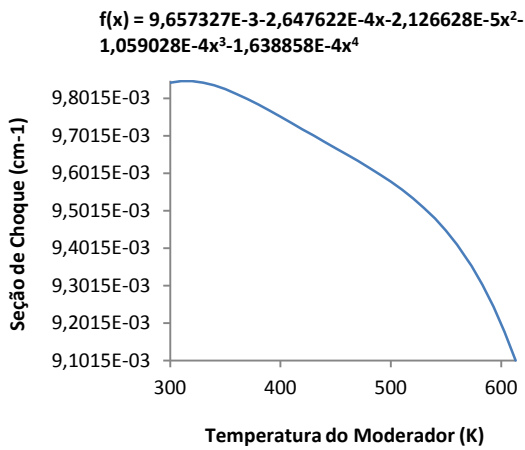


FIG. 11.61 Seção de choque de absorção rápida.

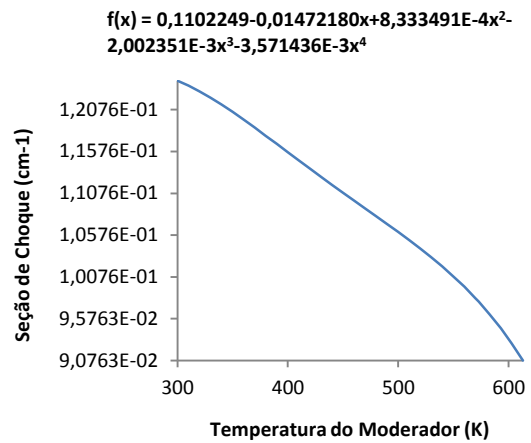


FIG. 11.62 Seção de choque de absorção térmica.

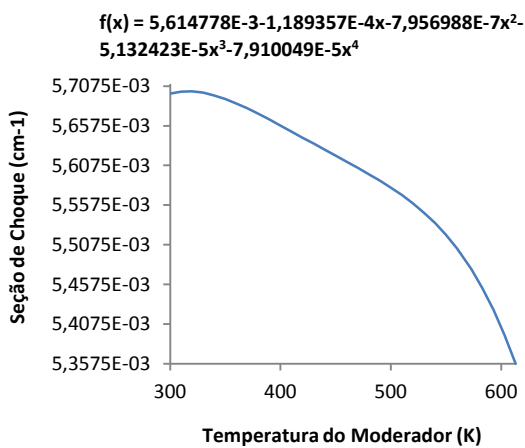


FIG. 11.63 Seção de choque de nu-fissão rápido.

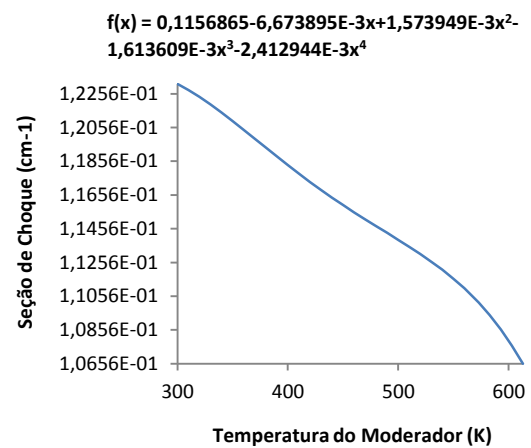


FIG. 11.64 Seção de choque de nu-fissão térmico.

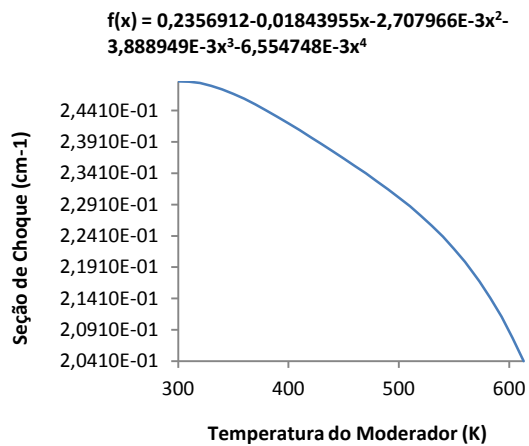


FIG. 11.65 Seção de choque de transporte rápido.

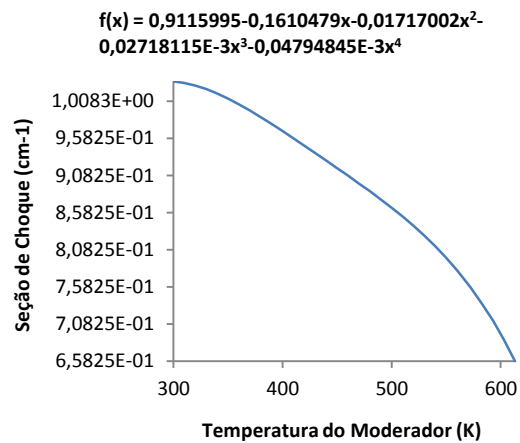


FIG. 11.66 Seção de choque de transporte térmico.

11.3.2.3 PARAMETRIZAÇÃO EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE BORO SOLÚVEL

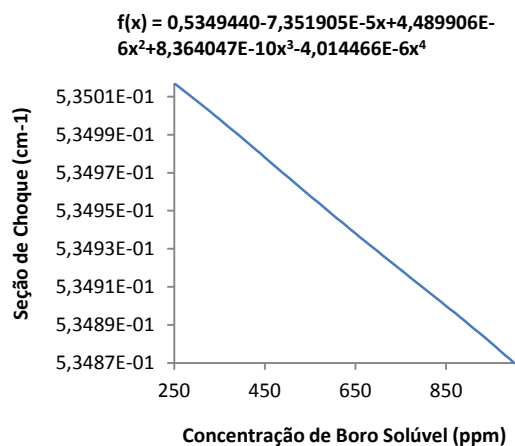


FIG. 11.67 Seção de choque total rápido.

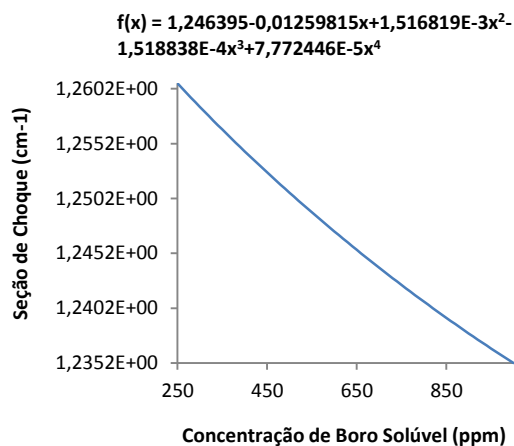


FIG. 11.68 Seção de choque total do grupo térmico.

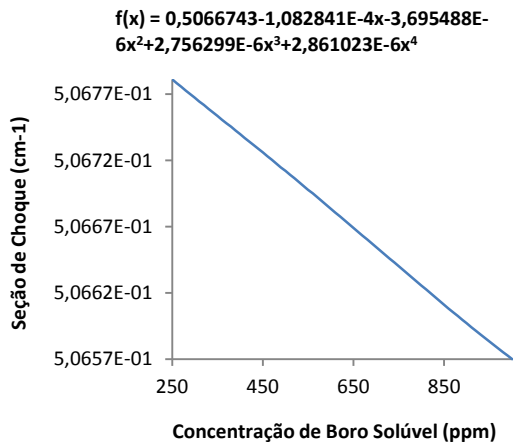


FIG. 11.69 Seção de choque de espalhamento 1-1.

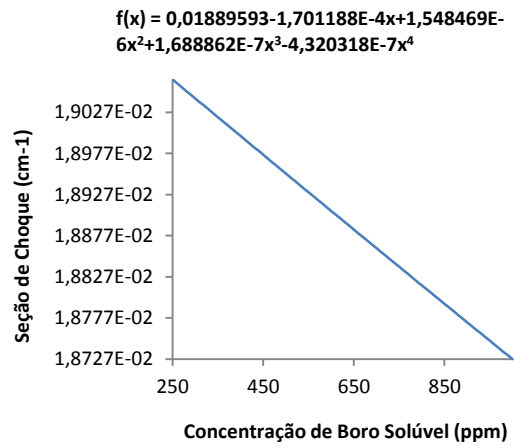


FIG. 11.70 Seção de choque de espalhamento 1-2.

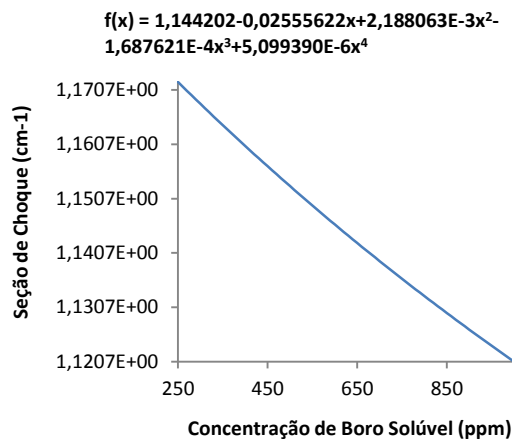


FIG. 11.71 Seção de choque de espalhamento 2-2.

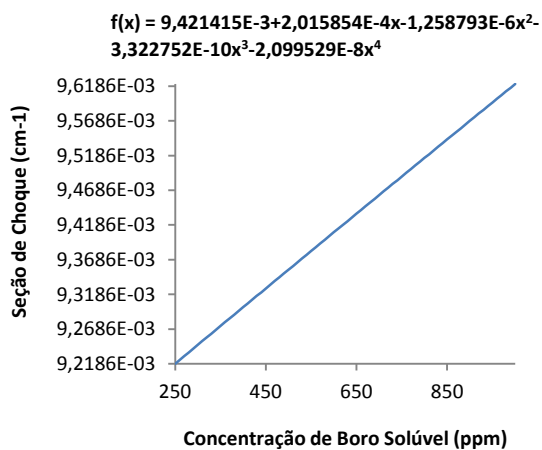


FIG. 11.72 Seção de choque de absorção rápida.

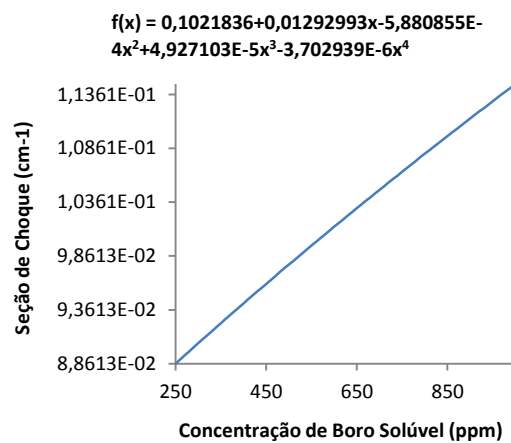


FIG. 11.73 Seção de choque de absorção térmica.

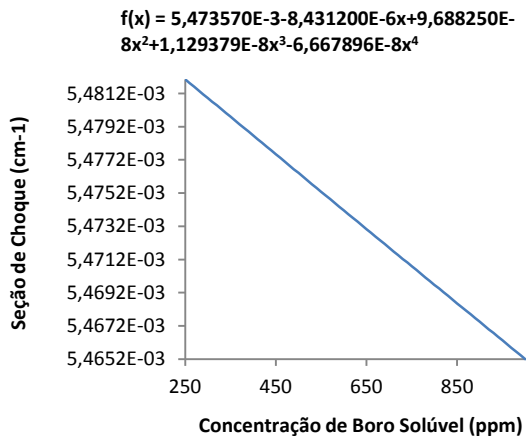


FIG. 11.74 Seção de choque de nu-fissão rápido.

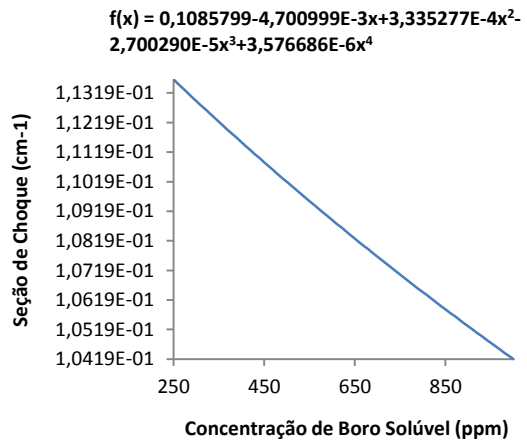


FIG. 11.75 Seção de choque de nu-fissão térmico.

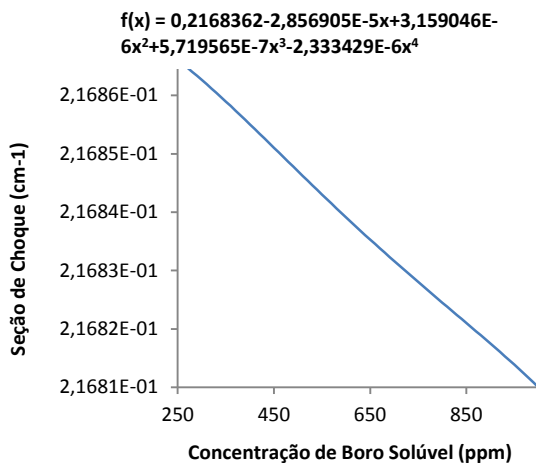


FIG. 11.76 Seção de choque de transporte rápido.

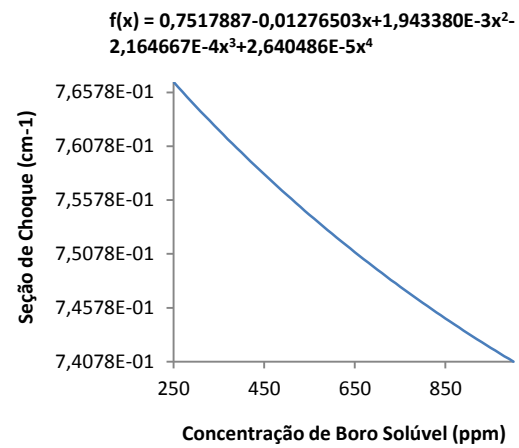


FIG. 11.77 Seção de choque de transporte térmico.

11.3.2.4 PARAMETRIZAÇÃO EM FUNÇÃO DO ENRIQUECIMENTO DE $^{235}_{92}\text{U}$

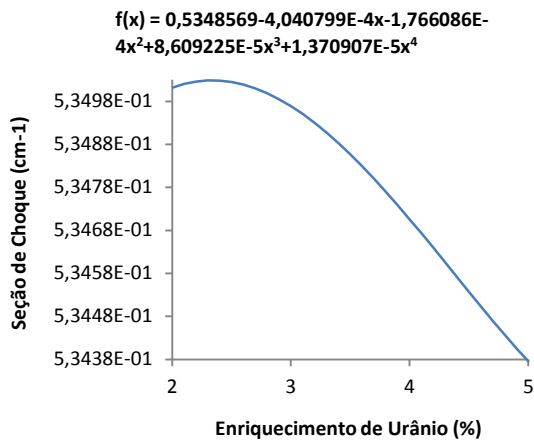


FIG. 11.78 Seção de choque total rápido.

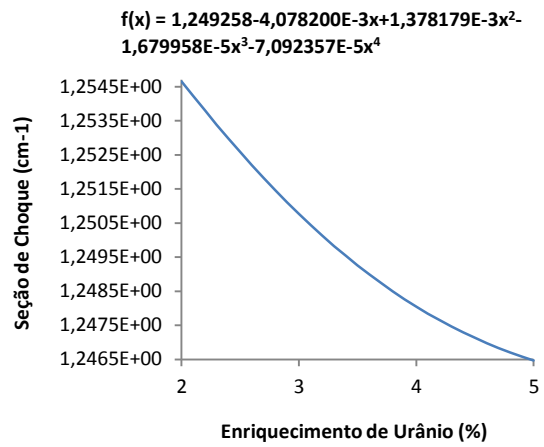


FIG. 11.79 Seção de choque total do grupo térmico.

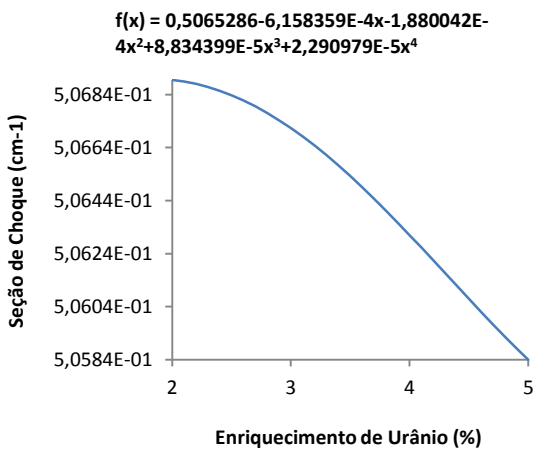


FIG. 11.80 Seção de choque de espalhamento 1-1.

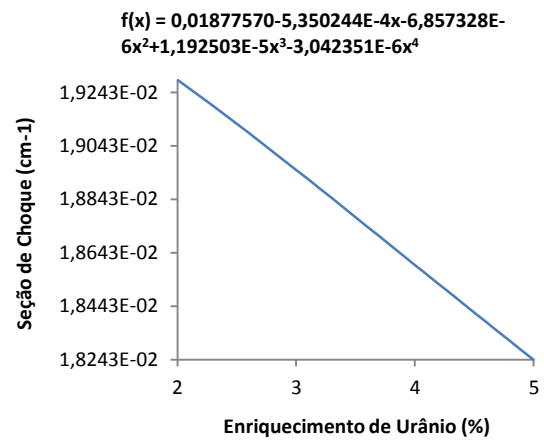


FIG. 11.81 Seção de choque de espalhamento 1-2.

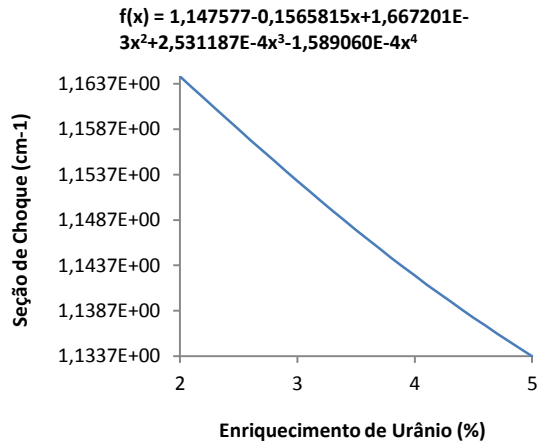


FIG. 11.82 Seção de choque de espalhamento 2-2.

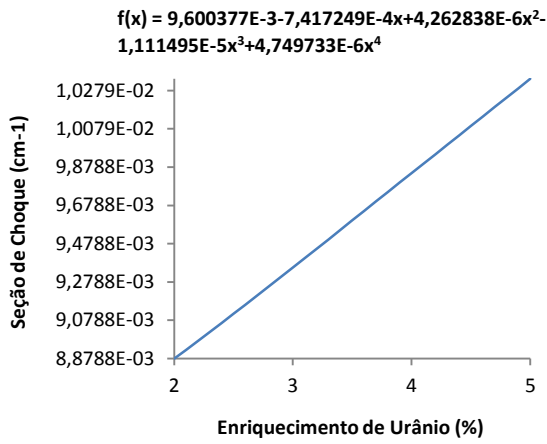


FIG. 11.83 Seção de choque de absorção rápida.

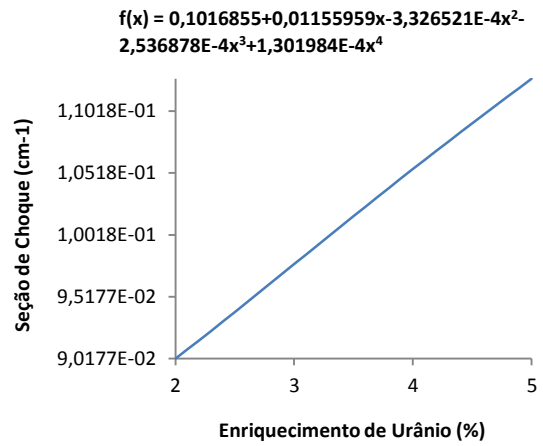


FIG. 11.84 Seção de choque de absorção térmica.

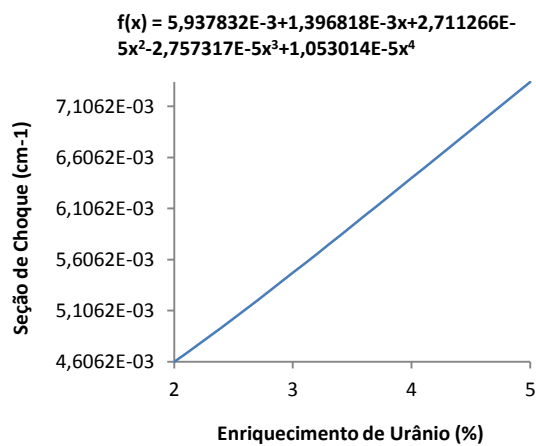


FIG. 11.85 Seção de choque de nu-fissão rápido.

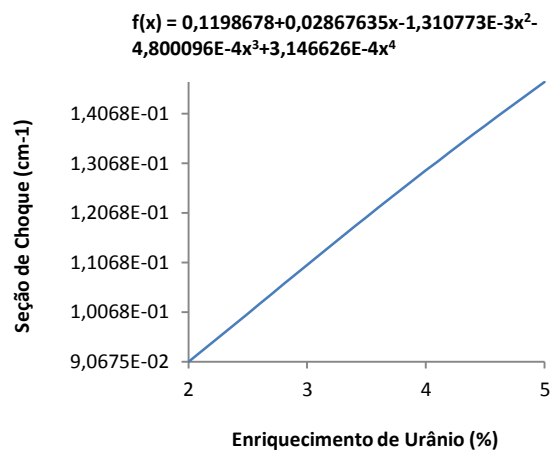


FIG. 11.86 Seção de choque de nu-fissão térmico.

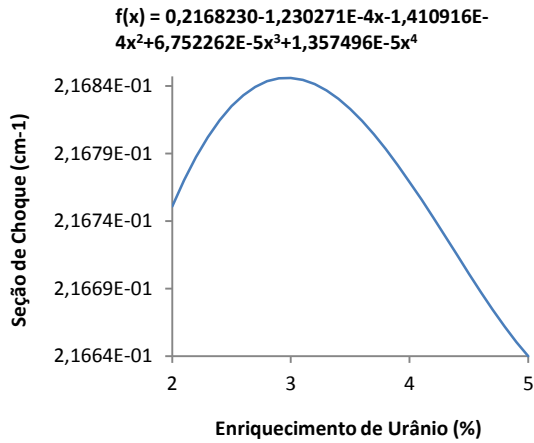


FIG. 11.87 Seção de choque de transporte rápido.

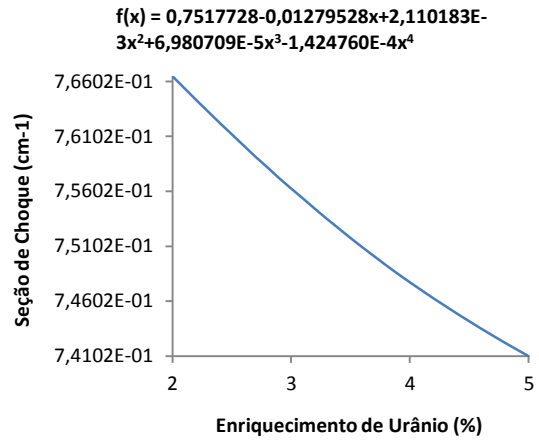


FIG. 11.88 Seção de choque de transporte térmico.

11.3.3 CICLO 2

11.3.3.1 PARAMETRIZAÇÃO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DO COMBUSTÍVEL

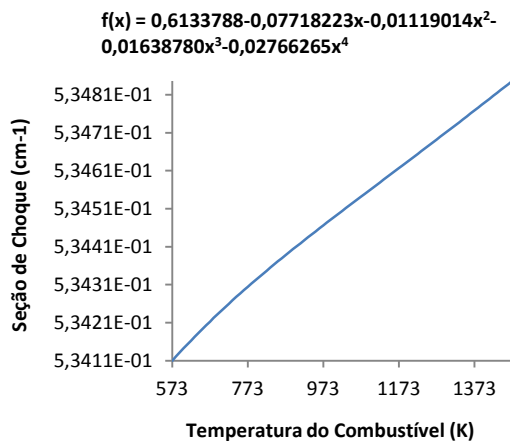


FIG. 11.89 Seção de choque total do grupo rápido.

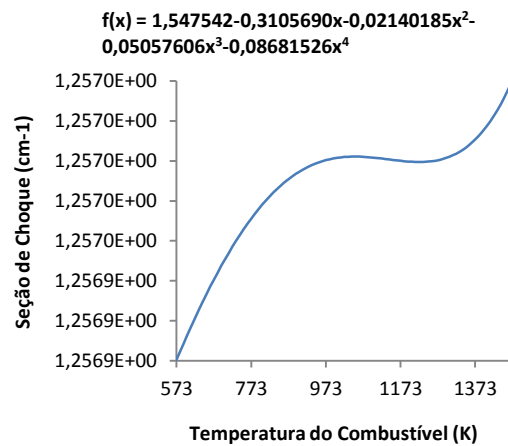


FIG. 11.90 Seção de choque total do grupo térmico.

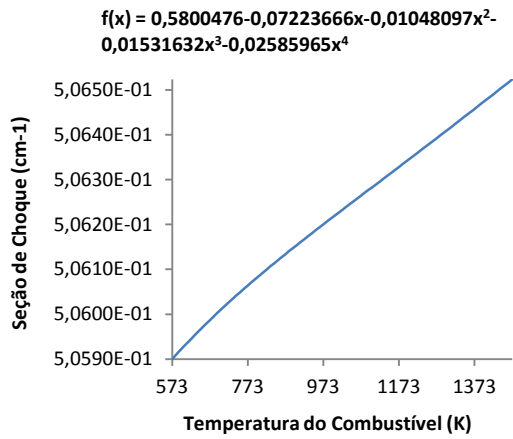


FIG. 11.91 Seção de choque de espalhamento 1-1.

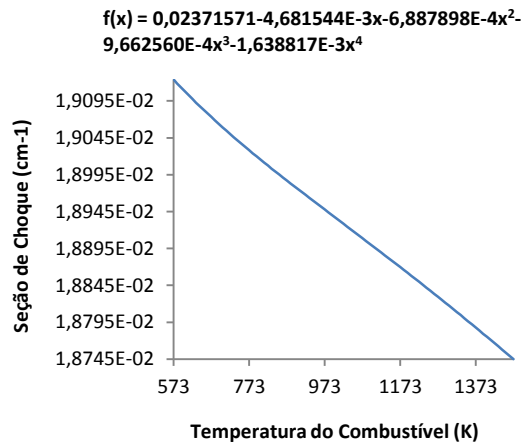


FIG. 11.92 Seção de choque de espalhamento 1-2.

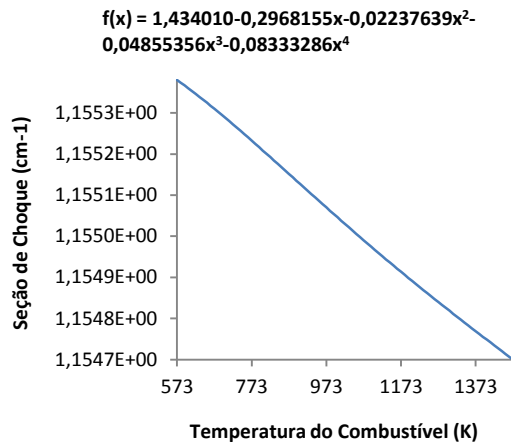


FIG. 11.93 Seção de choque de espalhamento 2-2.

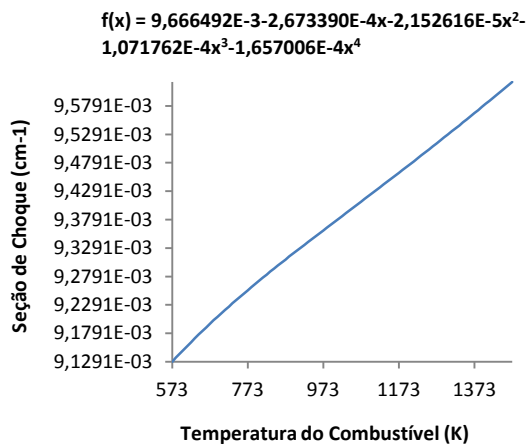


FIG. 11.94 Seção de choque de absorção rápida.

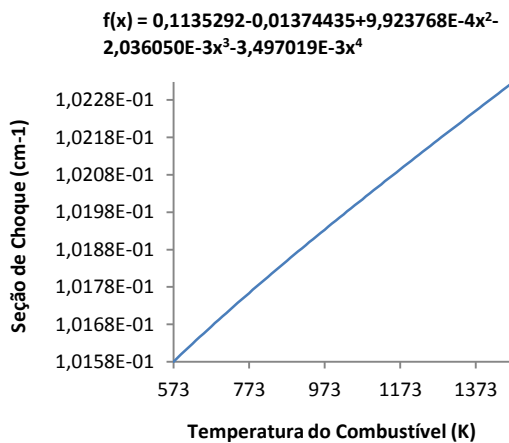


FIG. 11.95 Seção de choque de absorção térmica.

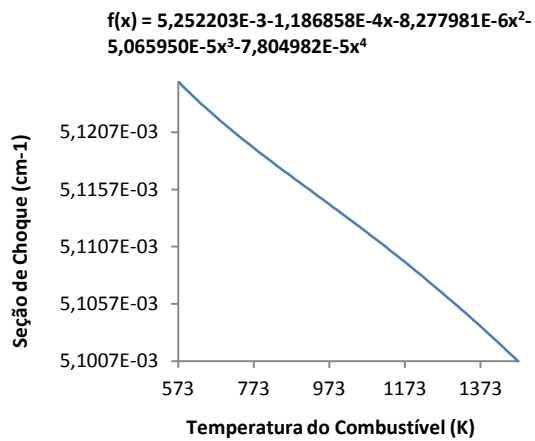


FIG. 11.96 Seção de choque de nu-fissão rápido.

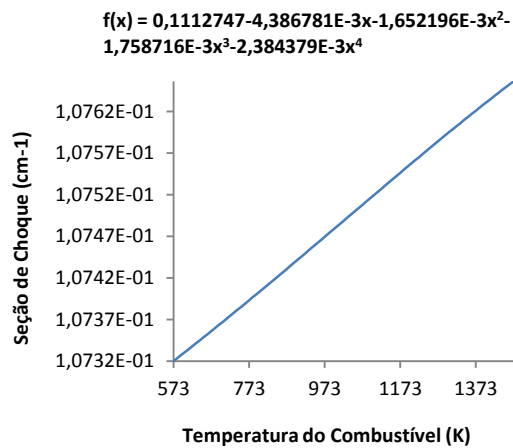


FIG. 11.97 Seção de choque de nu-fissão térmico.

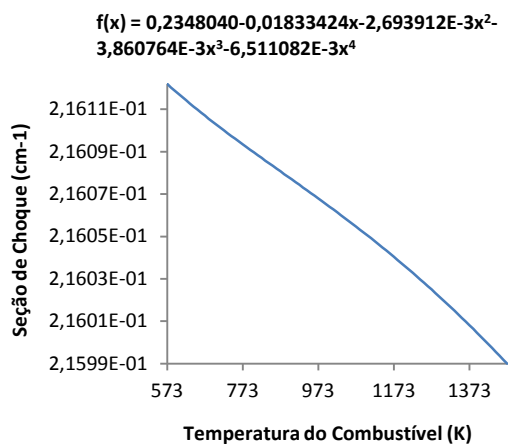


FIG. 11.98 Seção de choque de transporte rápido.

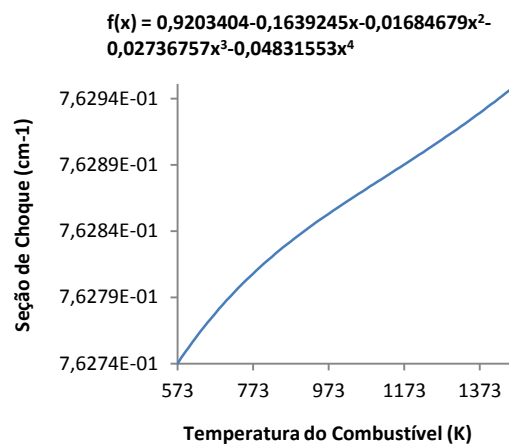


FIG. 11.99 Seção de choque de transporte térmico.

11.3.3.2 PARAMETRIZAÇÃO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA E DENSIDADE DO MODERADOR

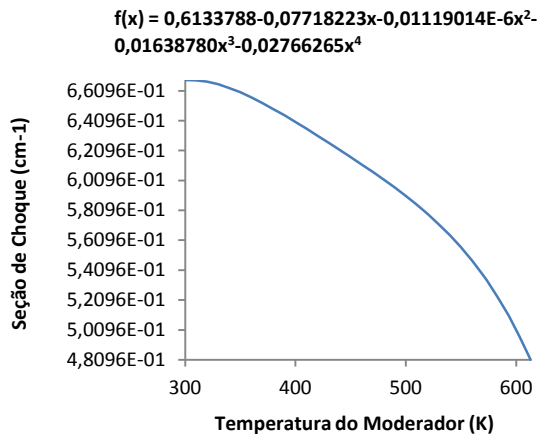


FIG. 11.100 Seção de choque total rápido.

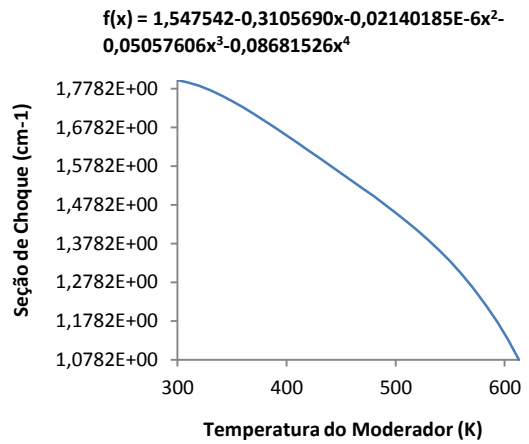


FIG. 11.101 Seção de choque total do grupo térmico.

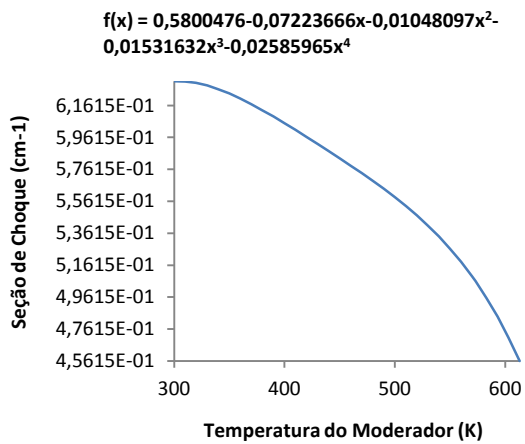


FIG. 11.102 Seção de choque de espalhamento 1-1.

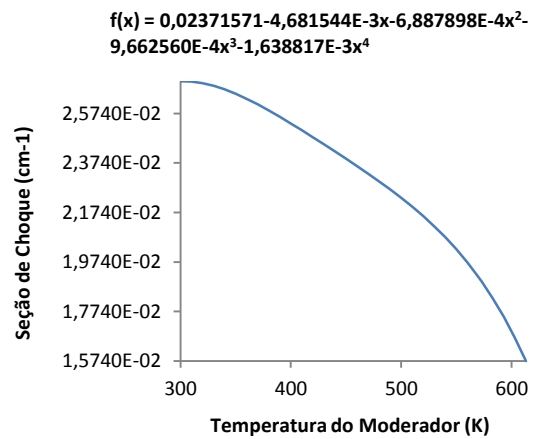


FIG. 11.103 Seção de choque de espalhamento 1-2.

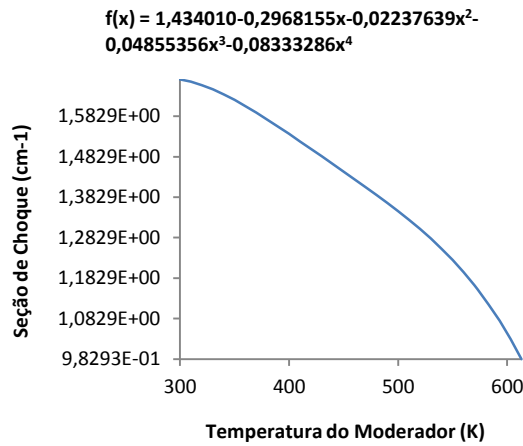


FIG. 11.104 Seção de choque de espalhamento 2-2.

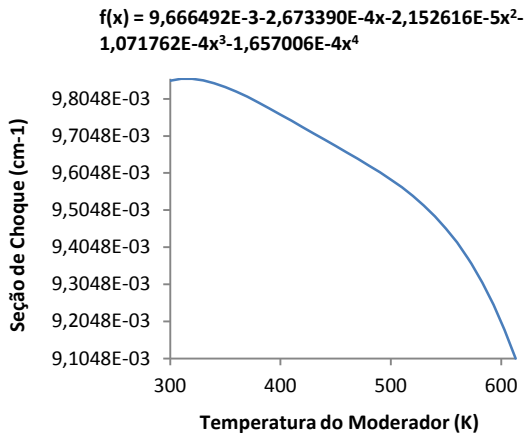


FIG. 11.105 Seção de choque de absorção rápida.

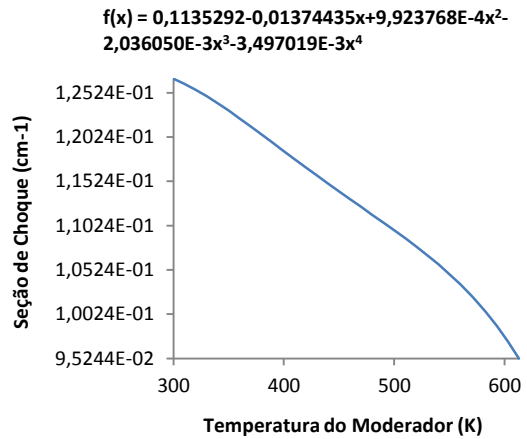


FIG. 11.106 Seção de choque de absorção térmica.

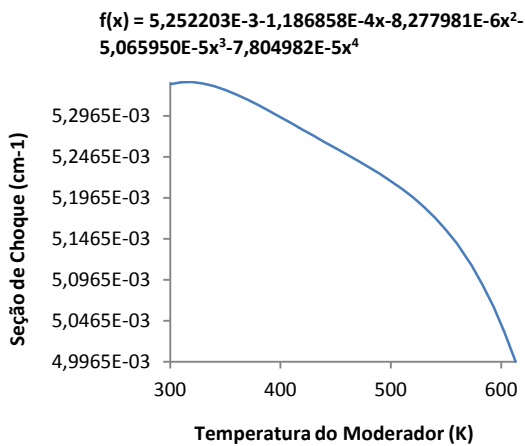


FIG. 11.107 Seção de choque de nu-fissão rápido.

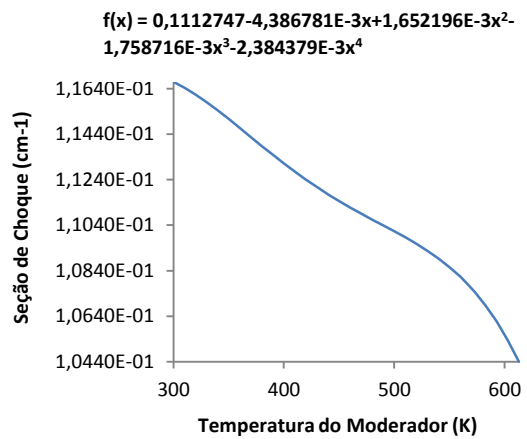


FIG. 11.108 Seção de choque de nu-fissão térmico.

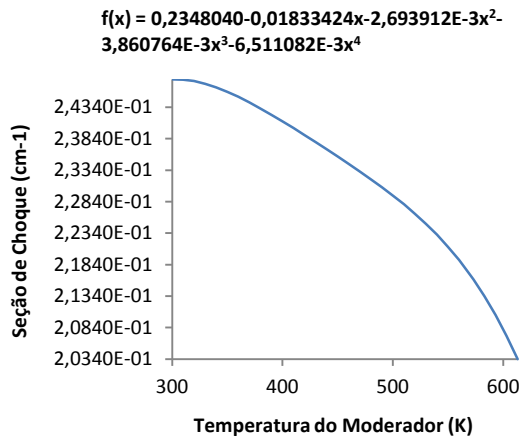


FIG. 11.109 Seção de choque de transporte rápido.

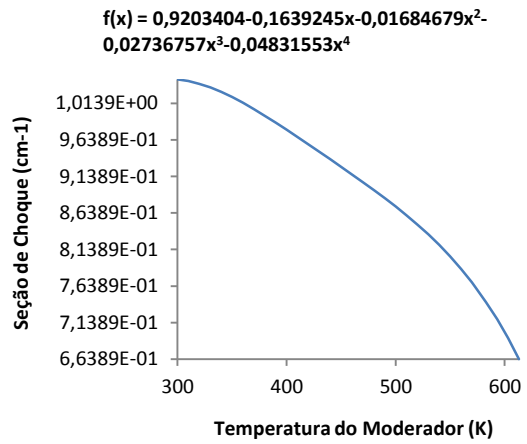


FIG. 11.110 Seção de choque de transporte térmico.

11.3.3.3 PARAMETRIZAÇÃO EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE BORO SOLÚVEL

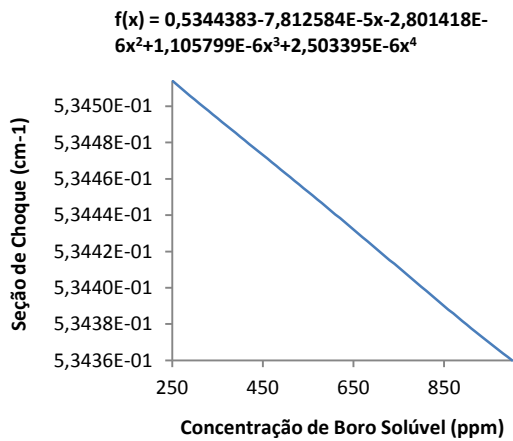


FIG. 11.111 Seção de choque total rápido.

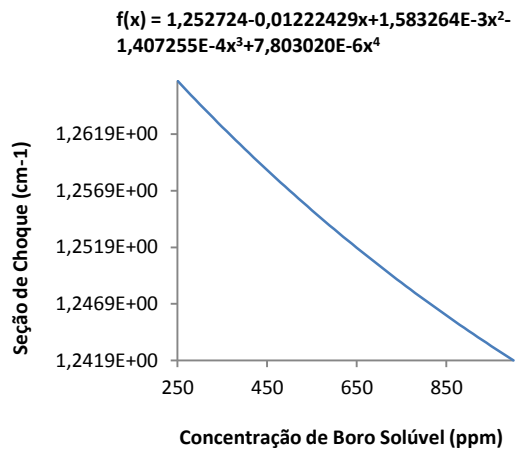


FIG. 11.112 Seção de choque total do grupo térmico.

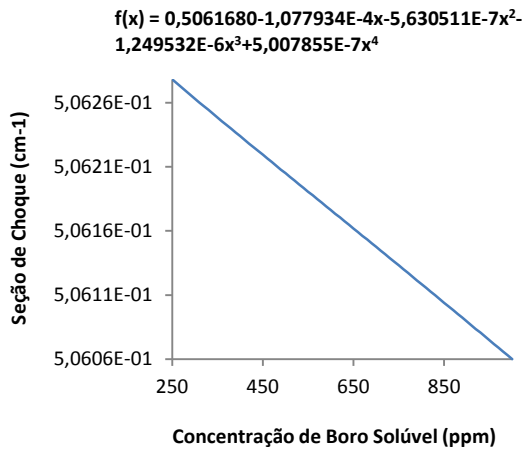


FIG. 11.113 Seção de choque de espalhamento 1-1.

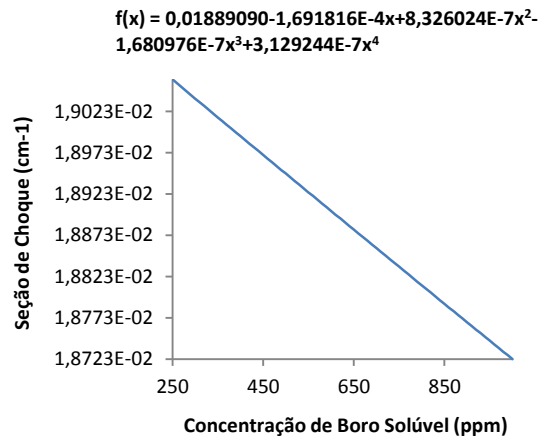


FIG. 11.114 Seção de choque de espalhamento 1-2.

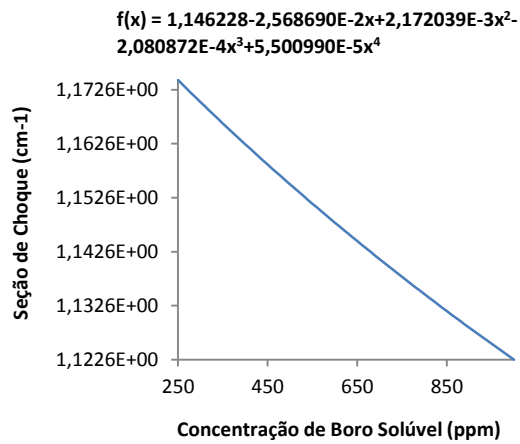


FIG. 11.115 Seção de choque de espalhamento 2-2.

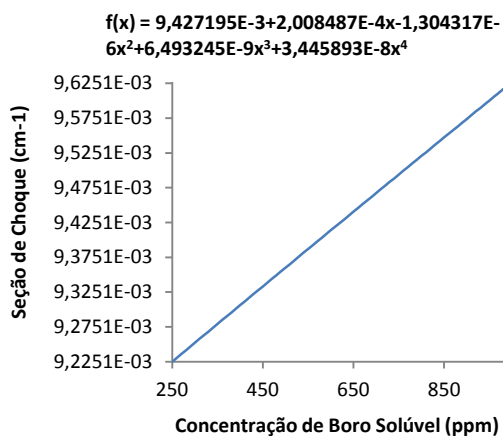


FIG. 11.116 Seção de choque de absorção rápida.

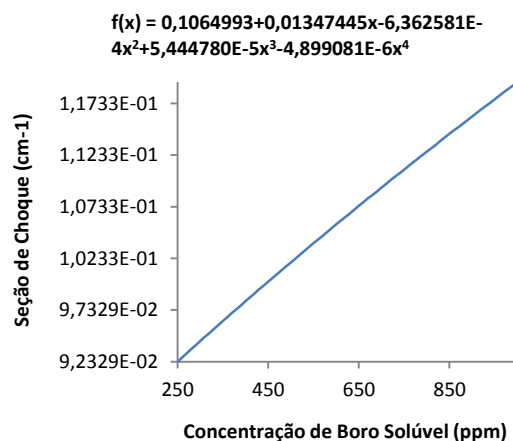


FIG. 11.117 Seção de choque de absorção térmica.

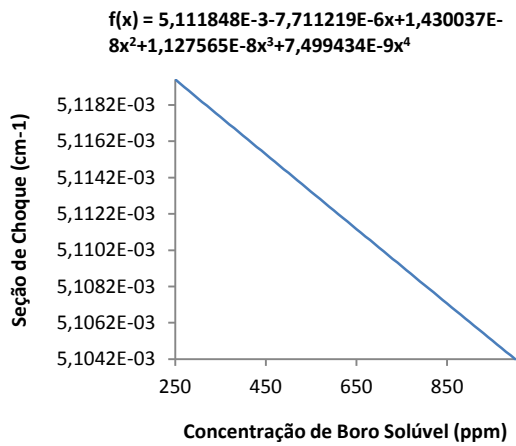


FIG. 11.118 Seção de choque de nu-fissão rápido.

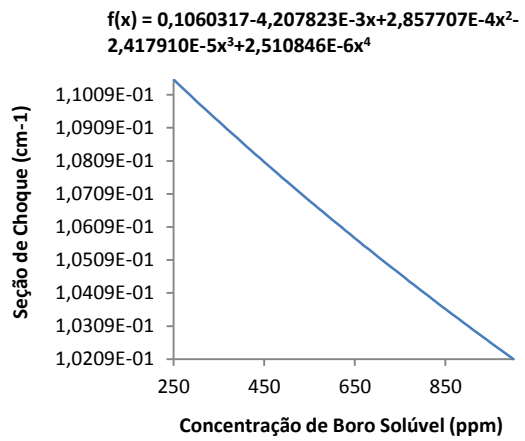


FIG. 11.119 Seção de choque de nu-fissão térmico.

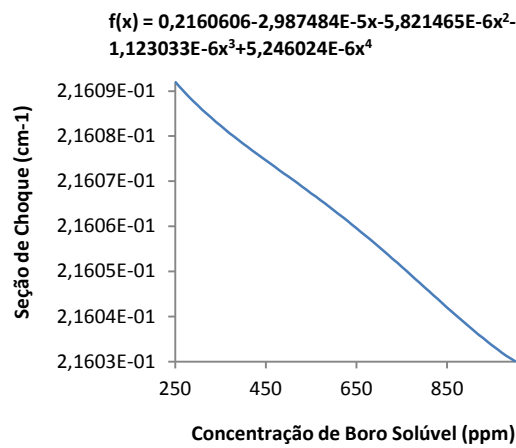


FIG. 11.120 Seção de choque de transporte rápido.

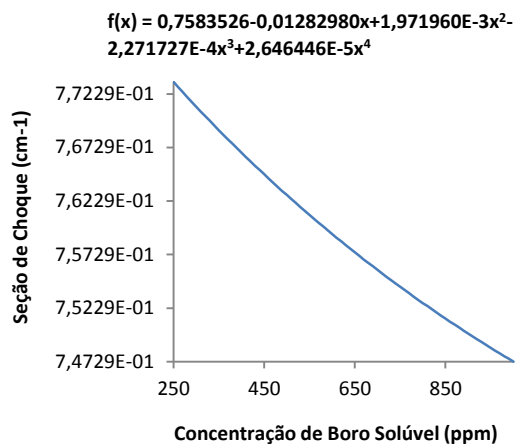


FIG. 11.121 Seção de choque de transporte térmico.

11.3.3.4 PARAMETRIZAÇÃO EM FUNÇÃO DO ENRIQUECIMENTO DE $^{235}_{92}\text{U}$

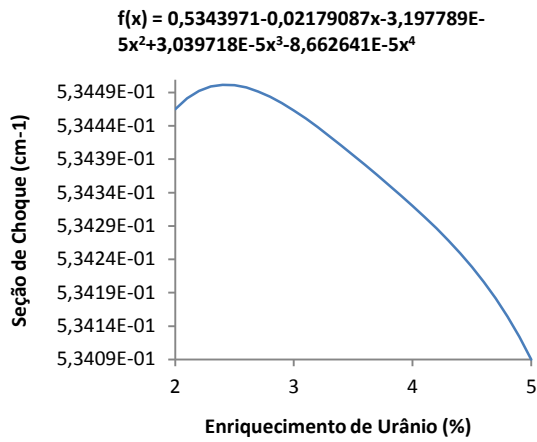


FIG. 11.122 Seção de choque total rápido.

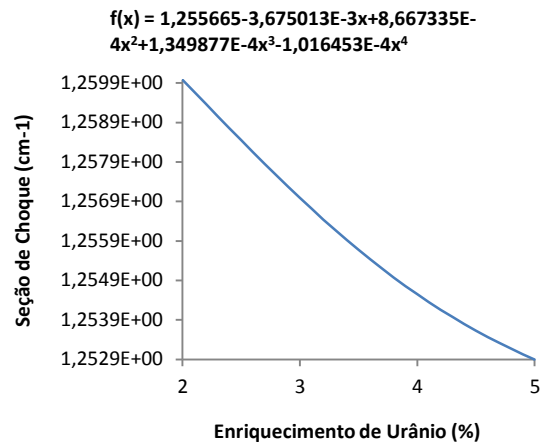


FIG. 11.123 Seção de choque total do grupo térmico.

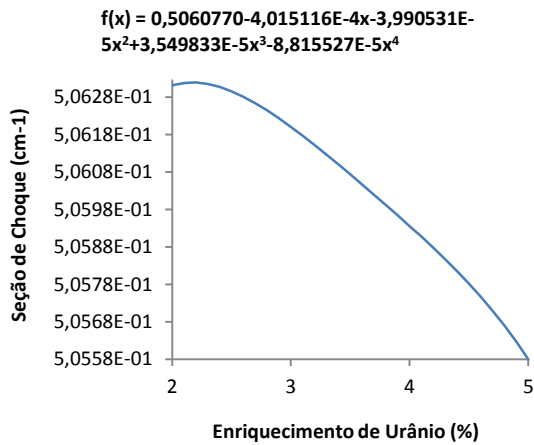


FIG. 11.124 Seção de choque de espalhamento 1-1.

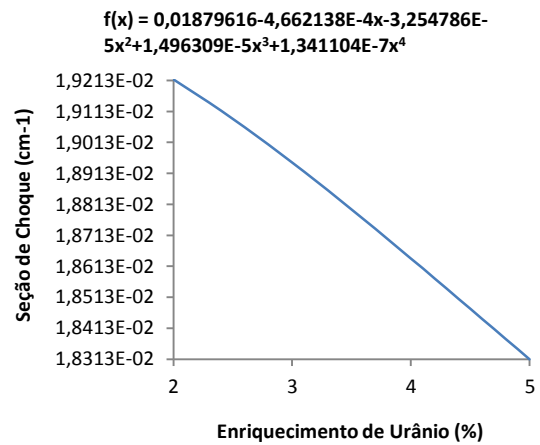


FIG. 11.125 Seção de choque de espalhamento 1-2.

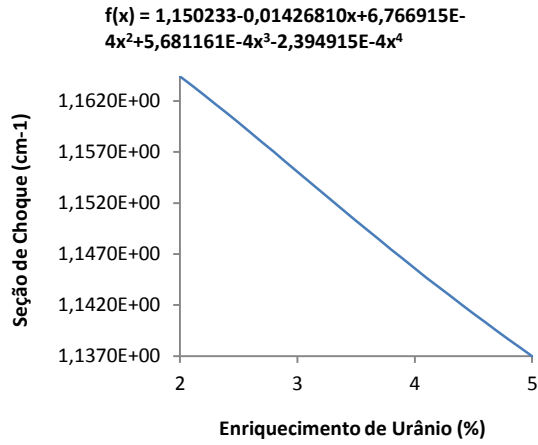


FIG. 11.126 Seção de choque de espalhamento 2-2.

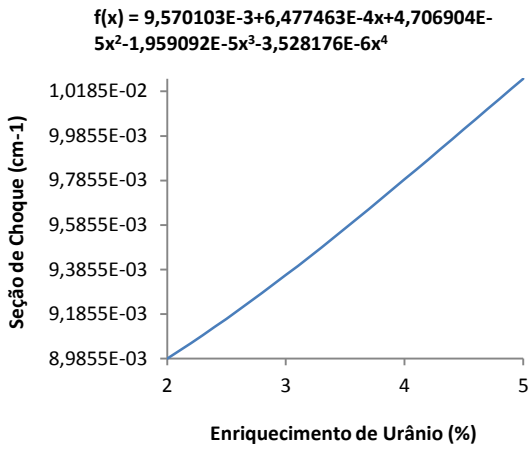


FIG. 11.127 Seção de choque de absorção rápida.

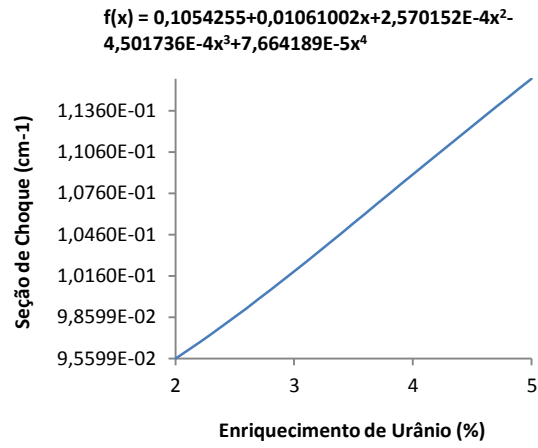


FIG. 11.128 Seção de choque de absorção térmica.

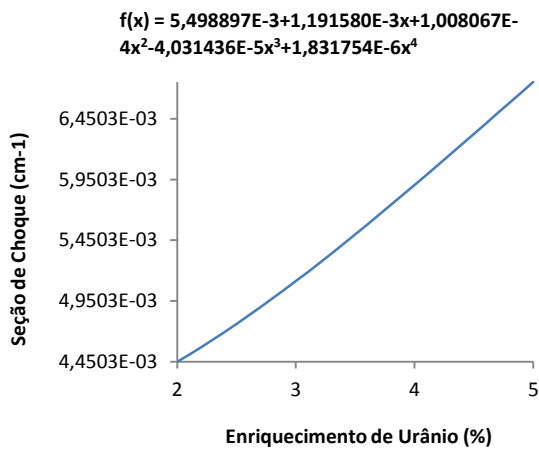


FIG. 11.129 Seção de choque de nu-fissão rápido.

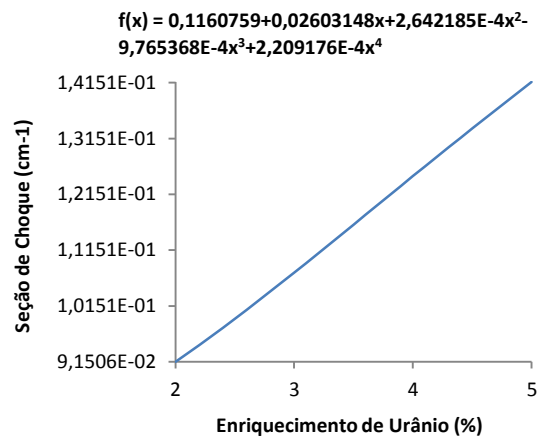


FIG. 11.130 Seção de choque de nu-fissão térmico.

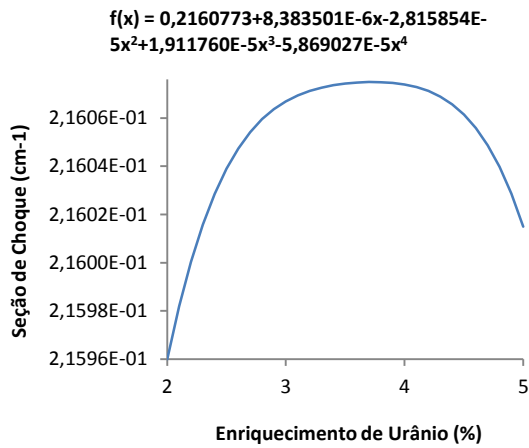


FIG. 11.131 Seção de choque de transporte rápido.

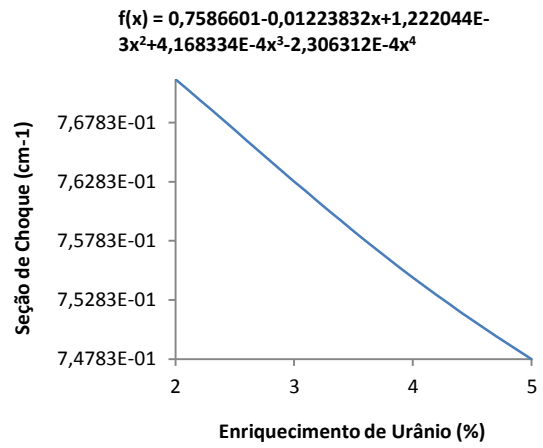


FIG. 11.132 Seção de choque de transporte térmico.

11.3.4 CICLO 3

11.3.4.1 PARAMETRIZAÇÃO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DO COMBUSTÍVEL

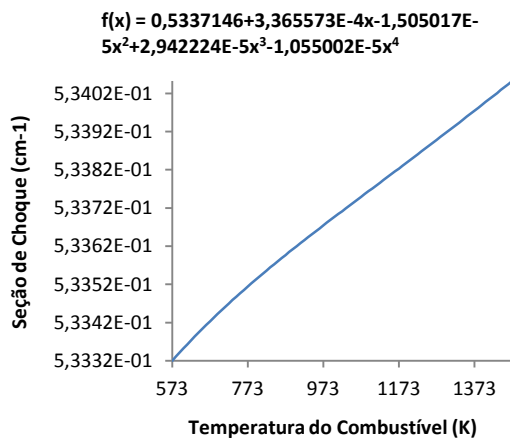


FIG. 11.133 Seção de choque total do grupo rápido.

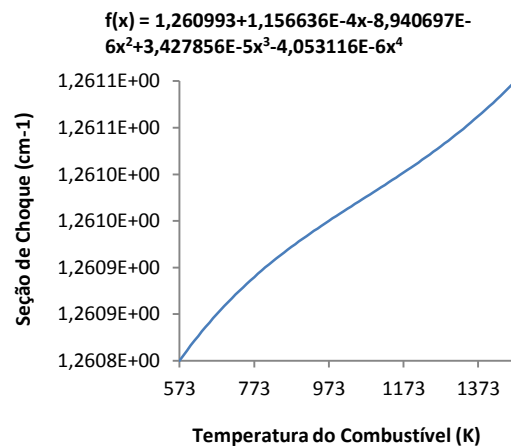


FIG. 11.134 Seção de choque total do grupo térmico.

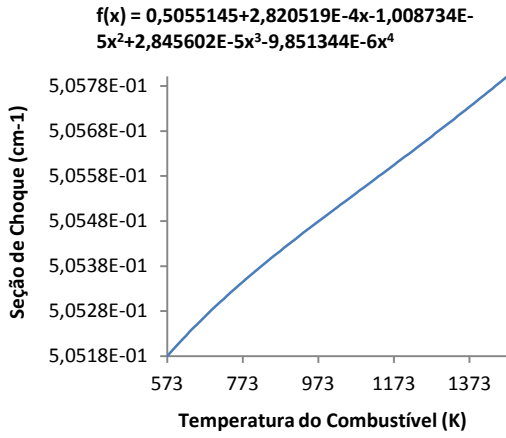


FIG. 11.135 Seção de choque de espalhamento 1-1.

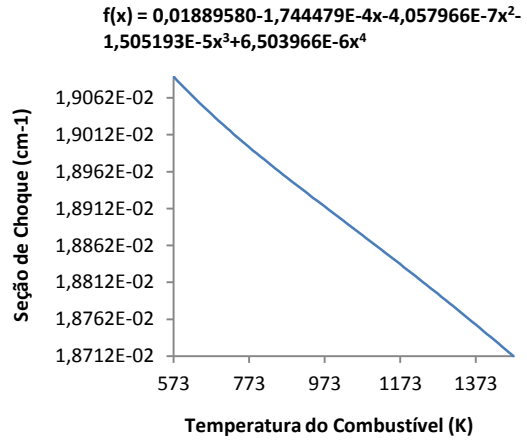


FIG. 11.136 Seção de choque de espalhamento 1-2.

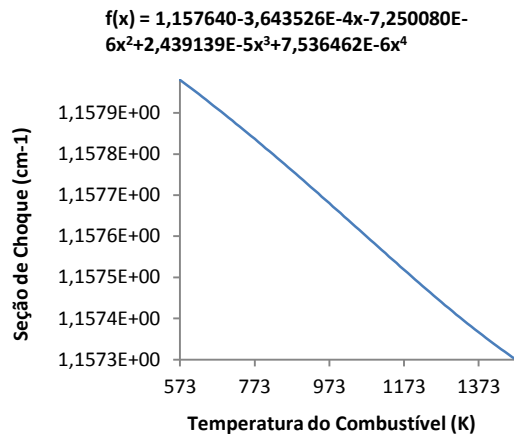


FIG. 11.137 Seção de choque de espalhamento 2-2.

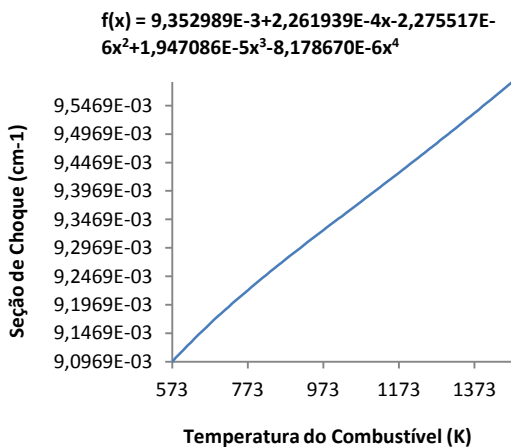


FIG. 11.138 Seção de choque de absorção rápida.

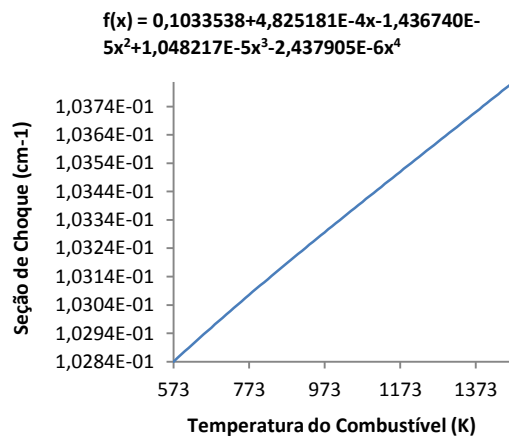


FIG. 11.139 Seção de choque de absorção térmica.

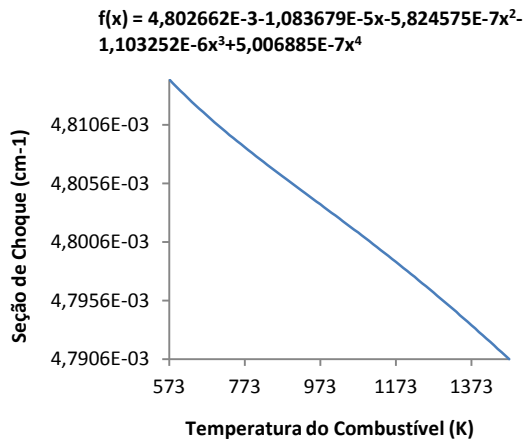


FIG. 11.140 Seção de choque de nu-fissão rápido.

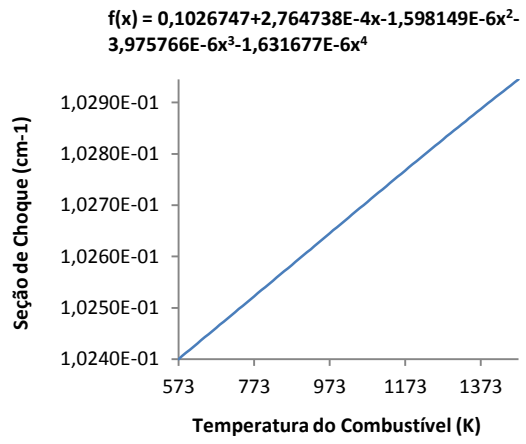


FIG. 11.141 Seção de choque de nu-fissão térmico.

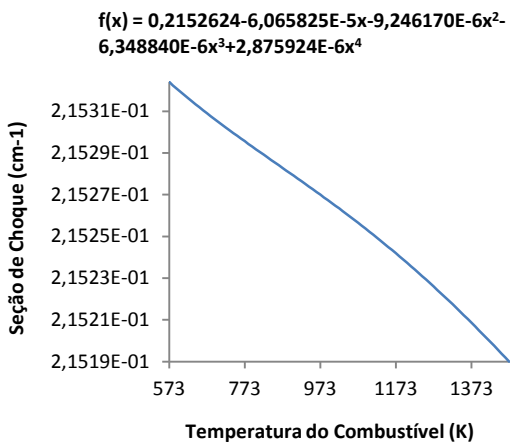


FIG. 11.142 Seção de choque de transporte rápido.

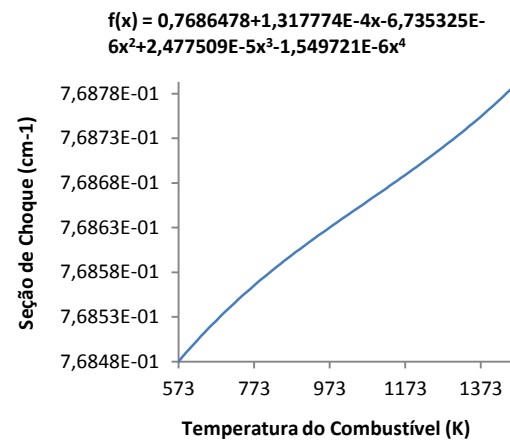


FIG. 11.143 Seção de choque de transporte térmico.

11.3.4.2 PARAMETRIZAÇÃO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA E DENSIDADE DO MODERADOR

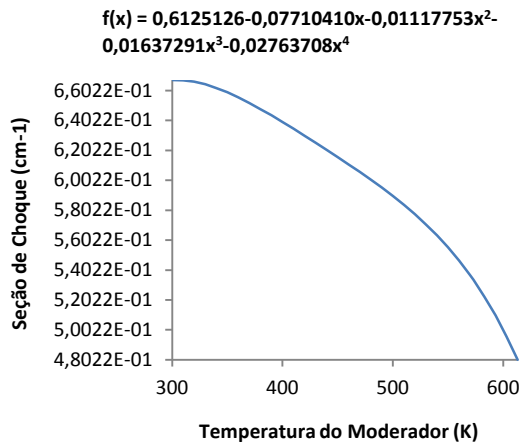


FIG. 11.144 Seção de choque total rápido.

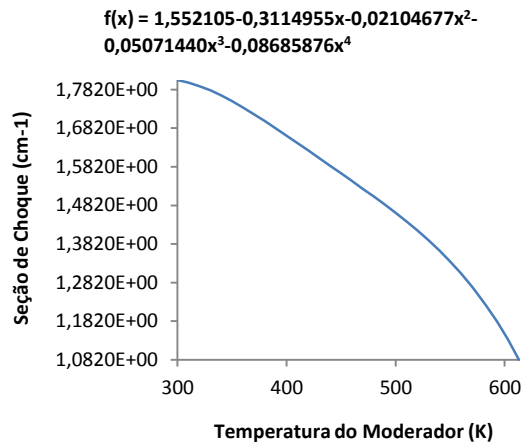


FIG. 11.145 Seção de choque total térmico.

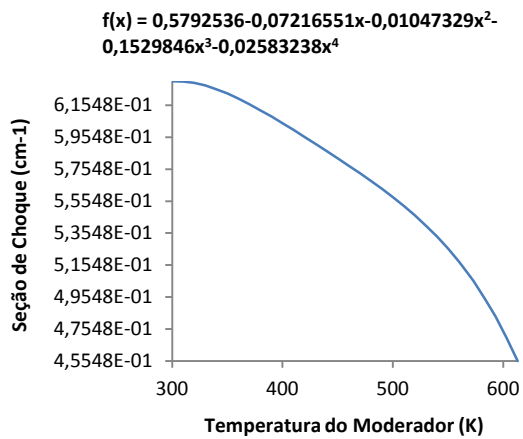


FIG. 11.146 Seção de choque de espalhamento 1-1.

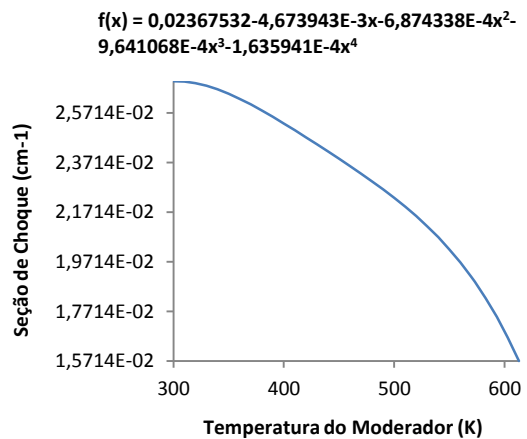


FIG. 11.147 Seção de choque de espalhamento 1-2.

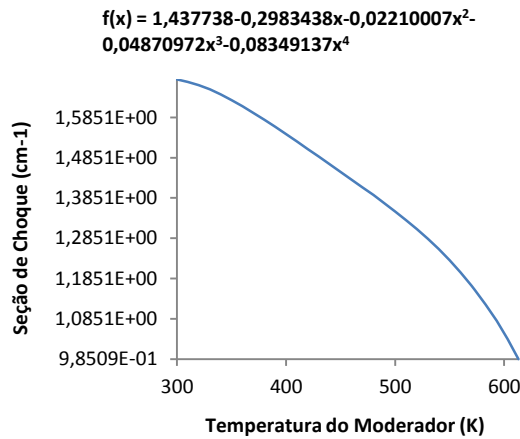


FIG. 11.148 Seção de choque de espalhamento 2-2.

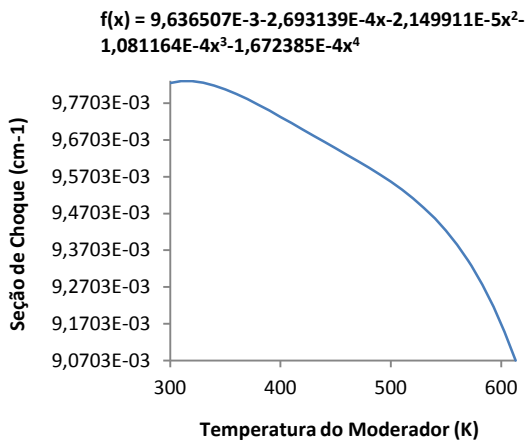


FIG. 11.149 Seção de choque de absorção rápida.

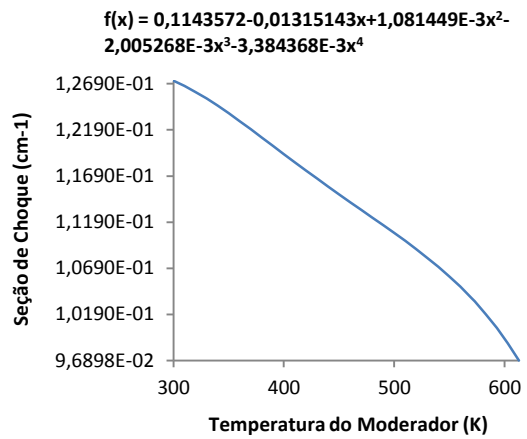


FIG. 11.150 Seção de choque de absorção térmica.

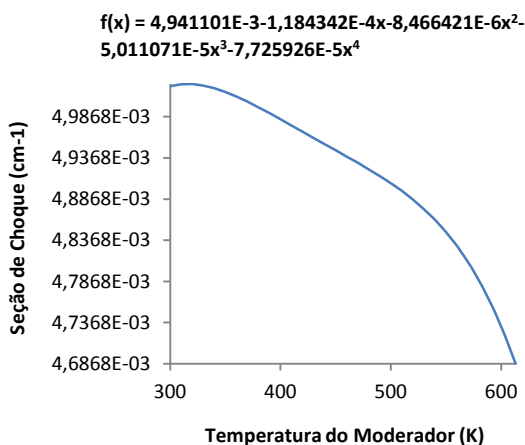


FIG. 11.151 Seção de choque de nu-fissão rápido.

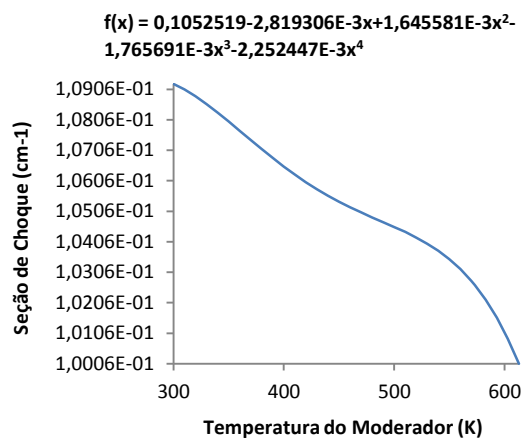


FIG. 11.152 Seção de choque de nu-fissão térmico.

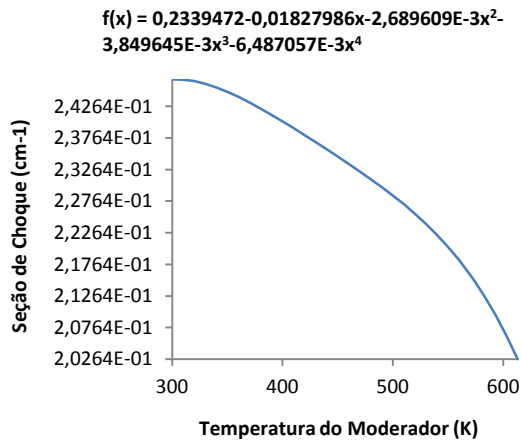


FIG. 11.153 Seção de choque de transporte rápido.

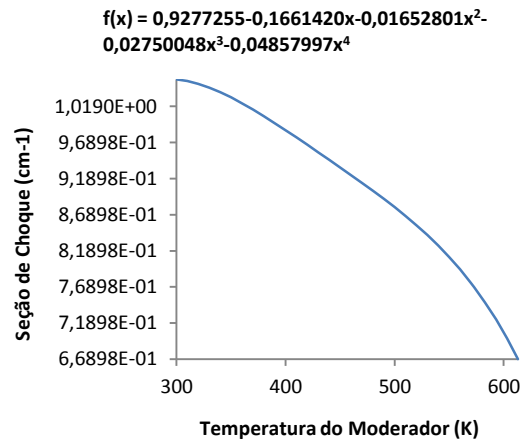


FIG. 11.154 Seção de choque de transporte térmico.

11.3.4.3 PARAMETRIZAÇÃO EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE BORO SOLÚVEL

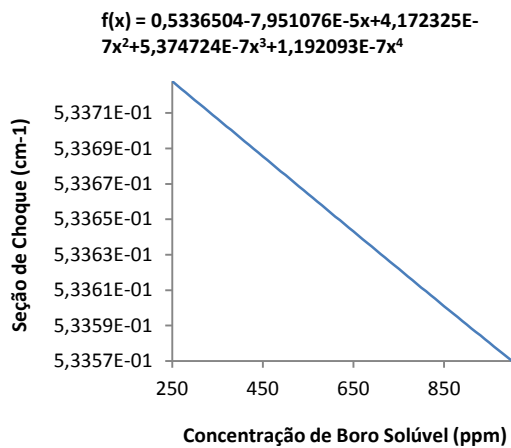


FIG. 11.155 Seção de choque total rápido.

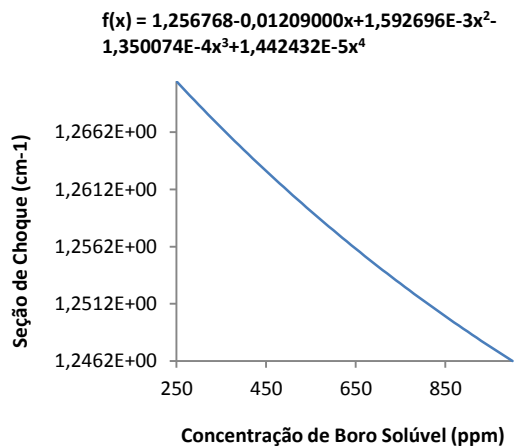


FIG. 11.156 Seção de choque total térmico.

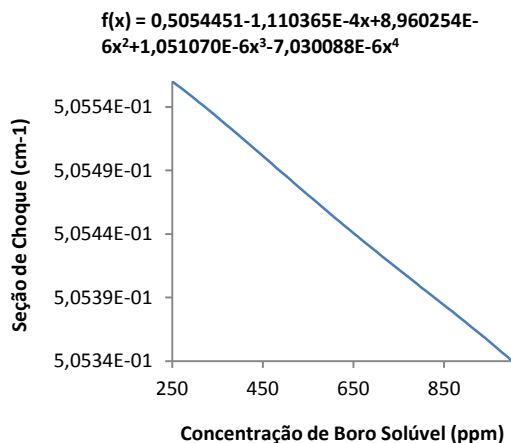


FIG. 11.157 Seção de choque de espalhamento 1-1.

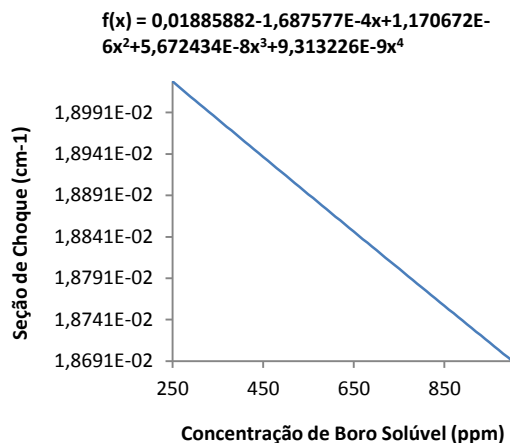


FIG. 11.158 Seção de choque de espalhamento 1-2.

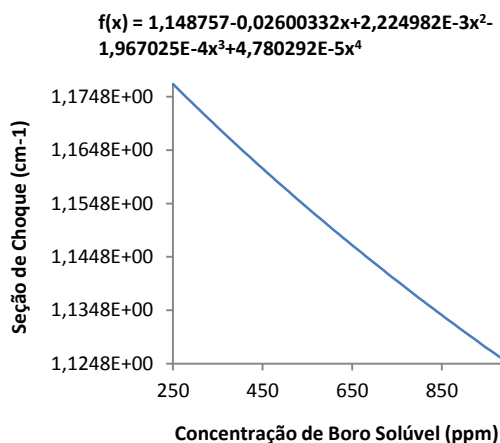


FIG. 11.159 Seção de choque de espalhamento 2-2.

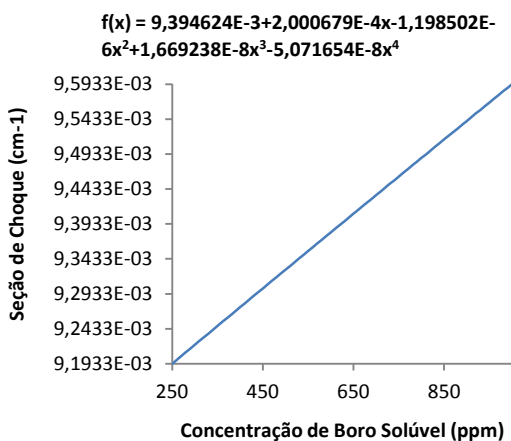


FIG. 11.160 Seção de choque de absorção rápida.

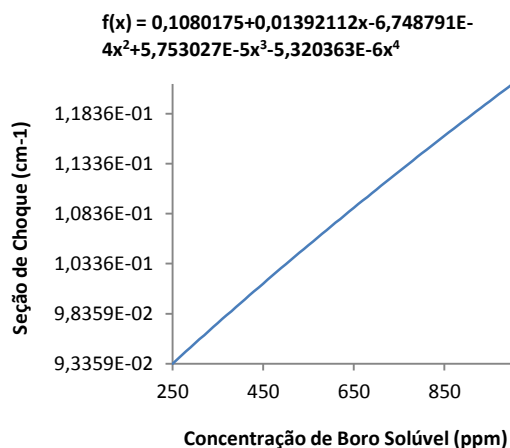


FIG. 11.161 Seção de choque de absorção térmica.

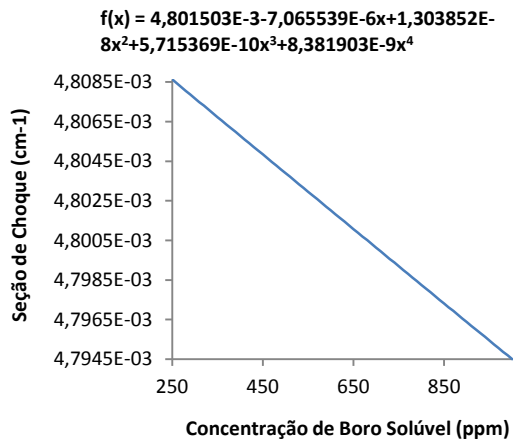


FIG. 11.162 Seção de choque de nu-fissão rápido.

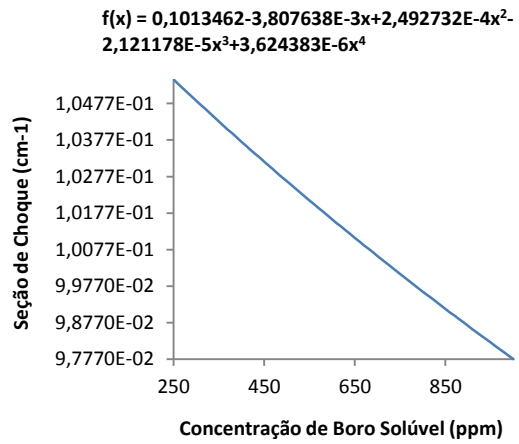


FIG. 11.163 Seção de choque de nu-fissão térmico.

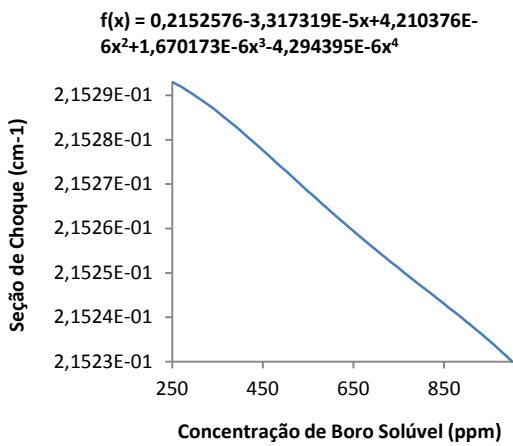


FIG. 11.164 Seção de choque de transporte rápido.

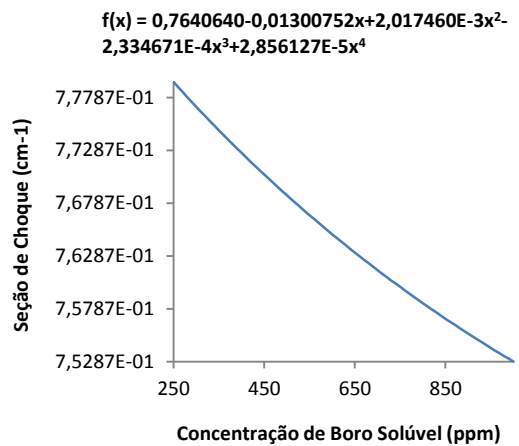


FIG. 11.165 Seção de choque de transporte térmico.

11.3.4.4 PARAMETRIZAÇÃO EM FUNÇÃO DO ENRIQUECIMENTO DE $^{235}_{92}\text{U}$

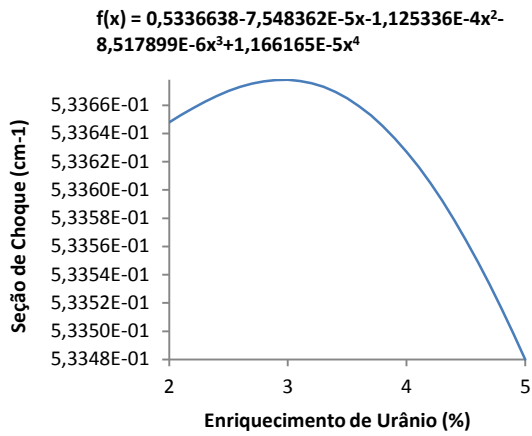


FIG. 11.166 Seção de choque total rápido.

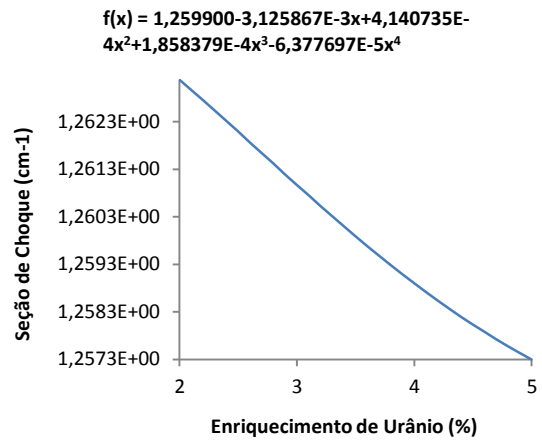


FIG. 11.167 Seção de choque total térmico.

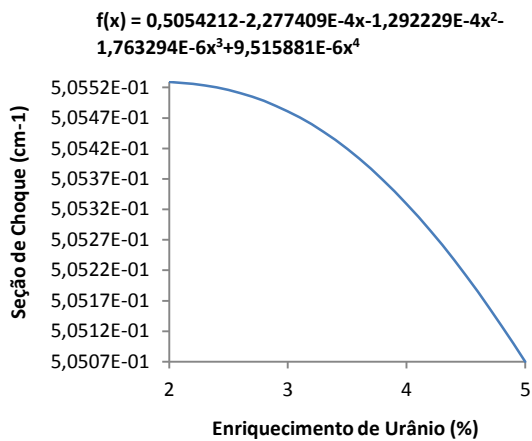


FIG. 11.168 Seção de choque de espalhamento 1-1.

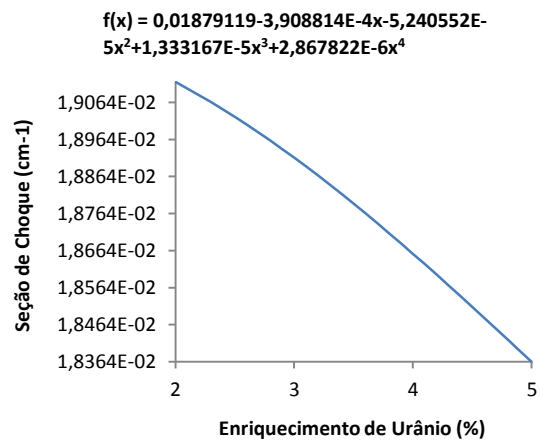


FIG. 11.169 Seção de choque de espalhamento 1-2.

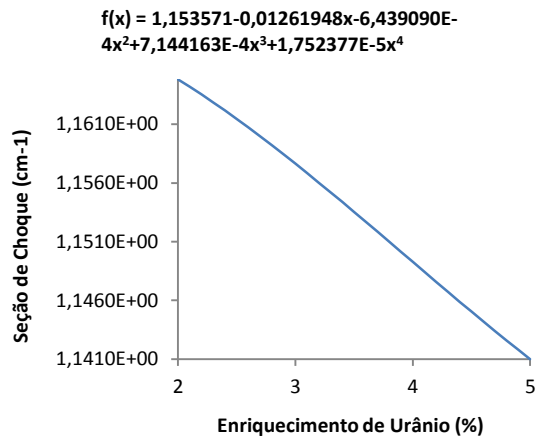


FIG. 11.170 Seção de choque de espalhamento 2-2.

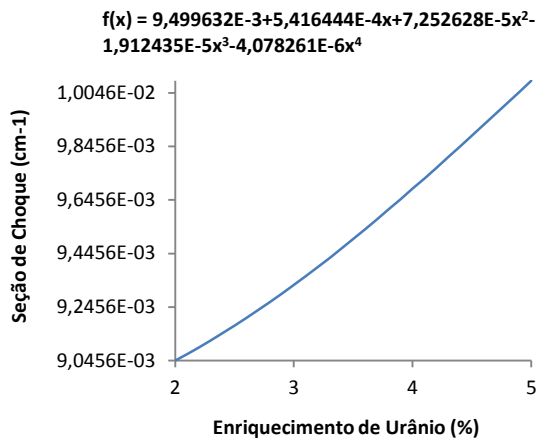


FIG. 11.171 Seção de choque de absorção rápida.

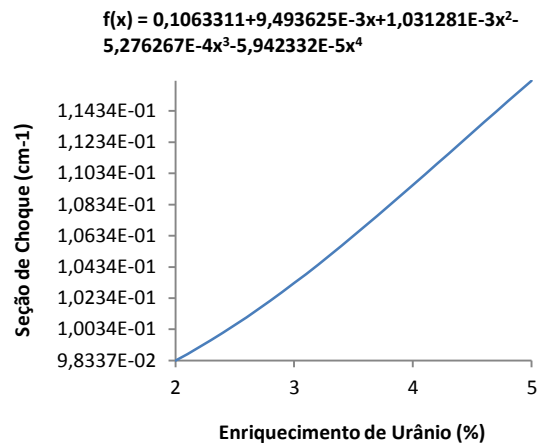


FIG. 11.172 Seção de choque de absorção térmica.

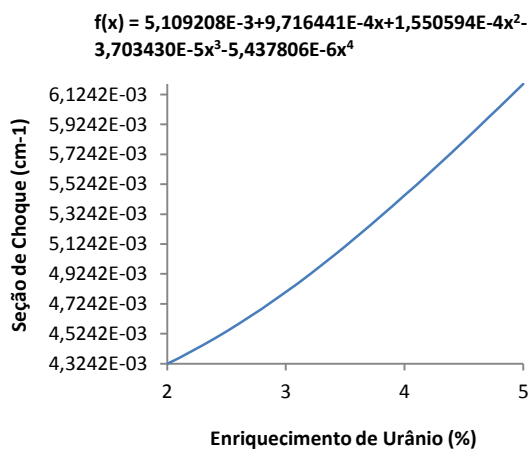


FIG. 11.173 Seção de choque de nu-fissão rápido.

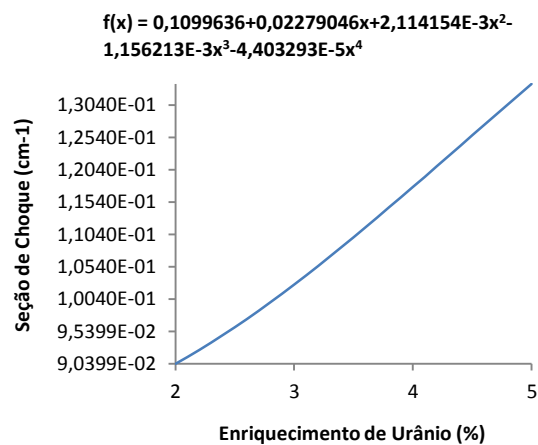


FIG. 11.174 Seção de choque de nu-fissão térmico.

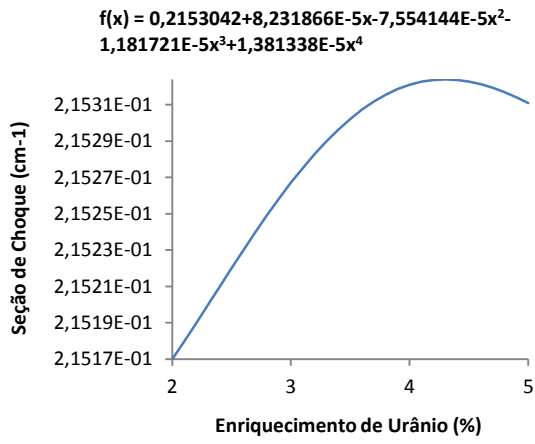


FIG. 11.175 Seção de choque de transporte rápido.

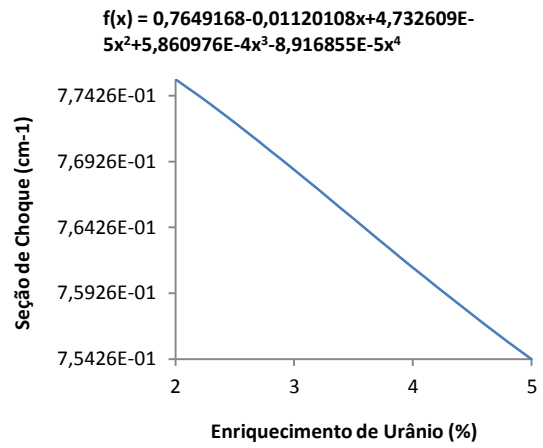


FIG. 11.176 Seção de choque de transporte térmico.

11.4 GRÁFICOS COMPLEMENTARES PARA O ELEMENTO COMBUSTÍVEL COM VENENO QUEIMÁVEL

De forma análoga ao apêndice anterior, este apêndice disponibiliza os gráficos do comportamento das seções de choque complementares, em função dos parâmetros de estado, citados na tabela 3.1, do capítulo 3, para o elemento combustível com veneno queimável. Este apêndice foi dividido em subcapítulos conforme o ciclo de queima do combustível e conforme o parâmetro que está sendo variado.

11.4.1 CICLO ZERO

11.4.1.1 PARAMETRIZAÇÃO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DO COMBUSTÍVEL

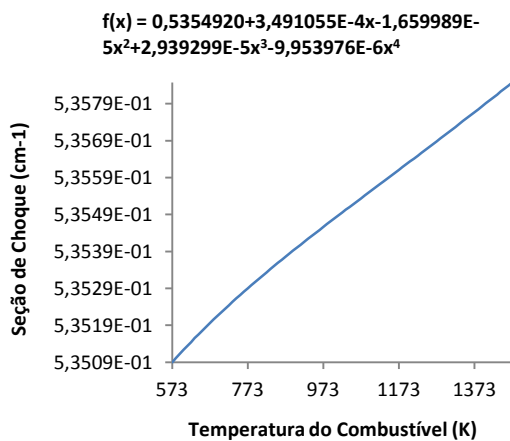


FIG. 11.177 Seção de choque total rápido.

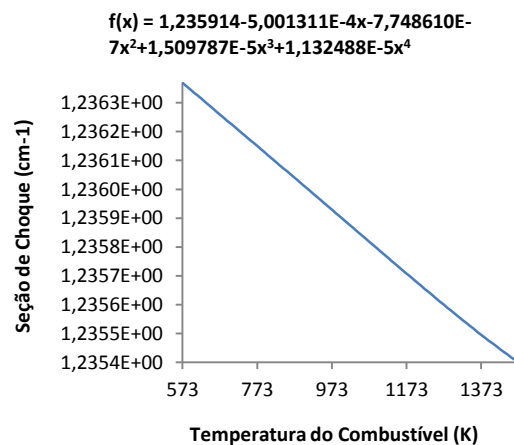


FIG. 11.178 Seção de choque total térmico.

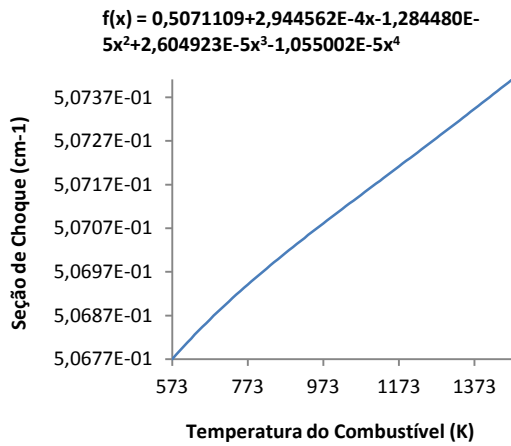


FIG. 11.179 Seção de choque de espalhamento 1-1.

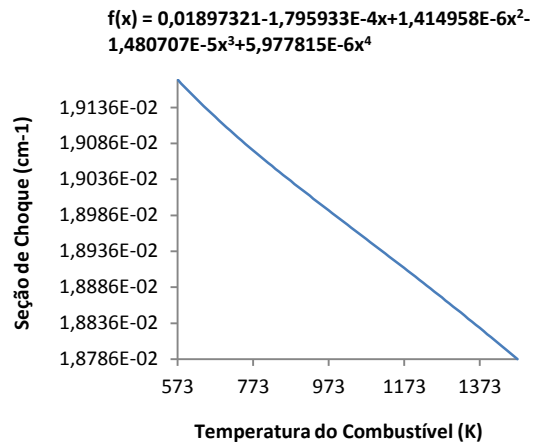


FIG. 11.180 Seção de choque de espalhamento 1-2.

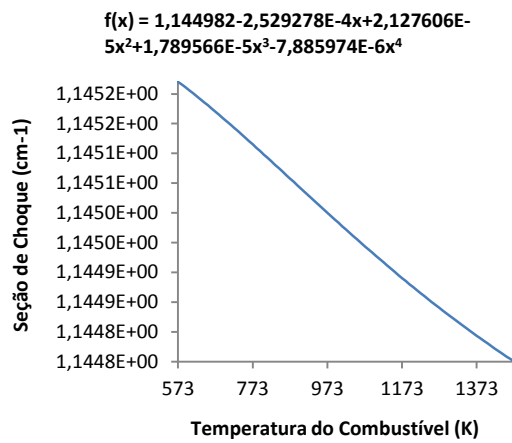


FIG. 11.181 Seção de choque de espalhamento 2-2.

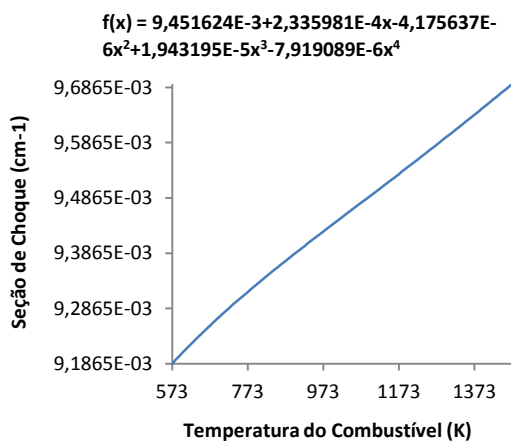


FIG. 11.182 Seção de choque de absorção rápida.

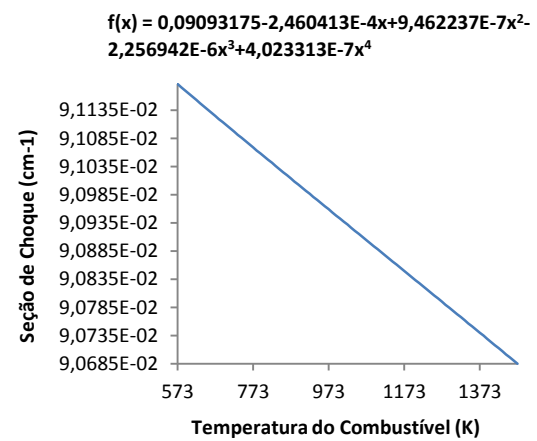


FIG. 11.183 Seção de choque de absorção térmica.

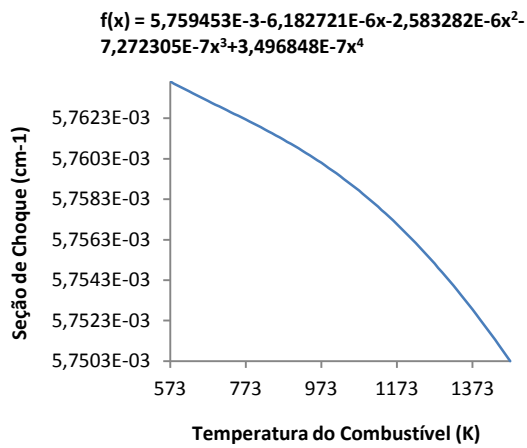


FIG. 11.184 Seção de choque de nu-fissão rápido.

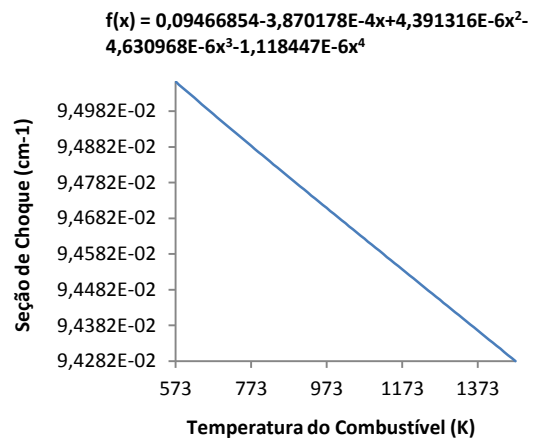


FIG. 11.185 Seção de choque de nu-fissão térmico.

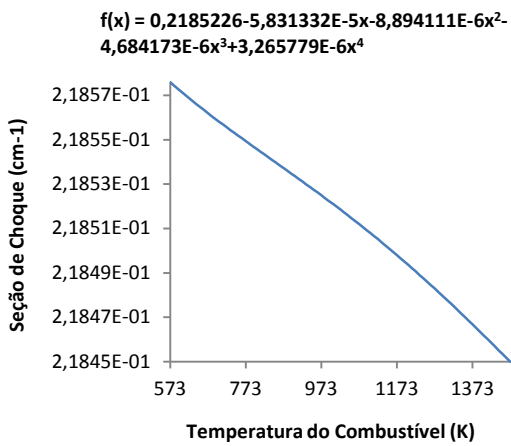


FIG. 11.186 Seção de choque de transporte rápido.

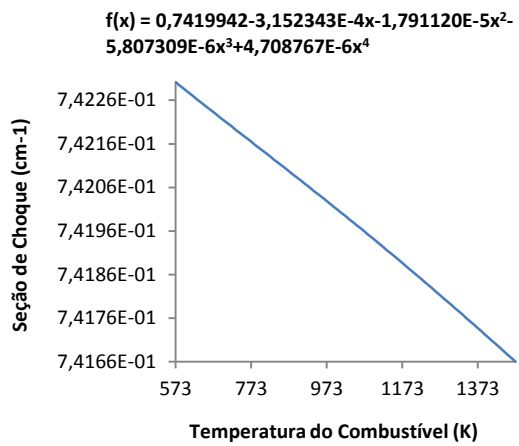


FIG. 11.187 Seção de choque de transporte térmico.

11.4.1.2 PARAMETRIZAÇÃO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA E DENSIDADE DO MODERADOR

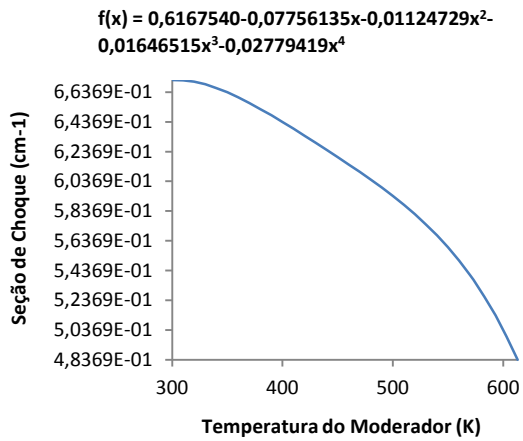


FIG. 11.188 Seção de choque total rápido.

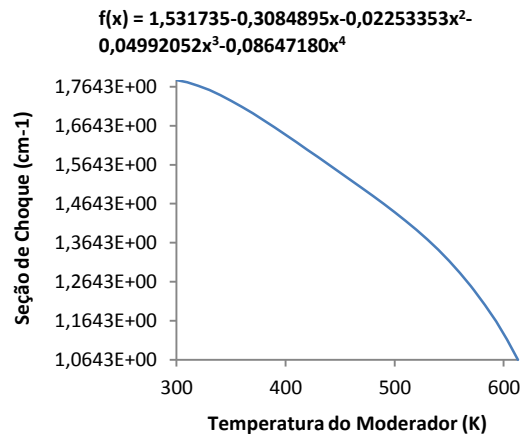


FIG. 11.189 Seção de choque total térmico.

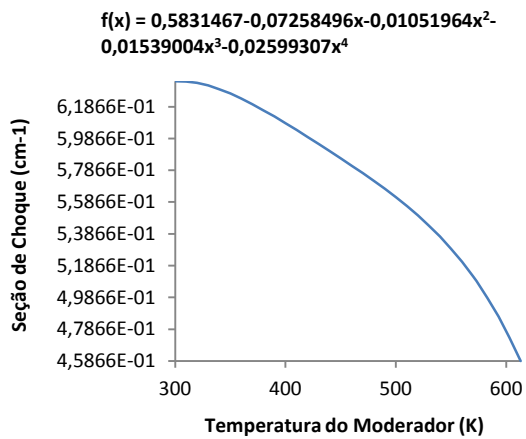


FIG. 11.190 Seção de choque de espalhamento 1-1.

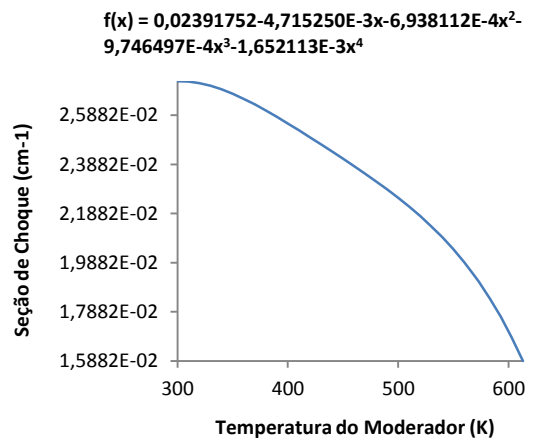


FIG. 11.191 Seção de choque de espalhamento 1-2.

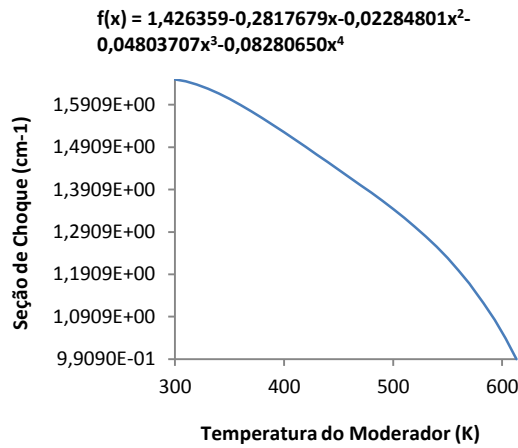


FIG. 11.192 Seção de choque de espalhamento 2-2.

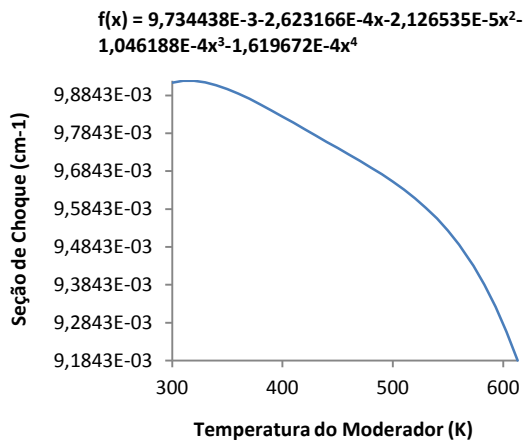


FIG. 11.193 Seção de choque de absorção rápida.

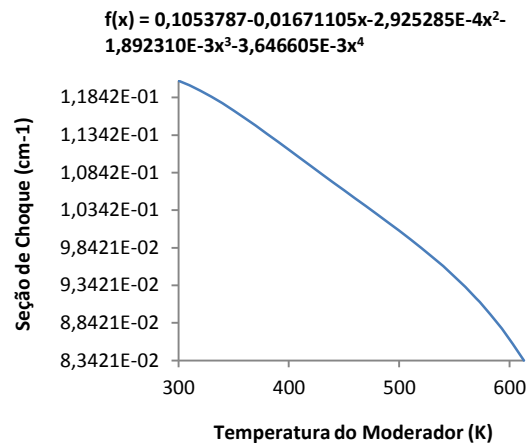


FIG. 11.194 Seção de choque de absorção térmica.

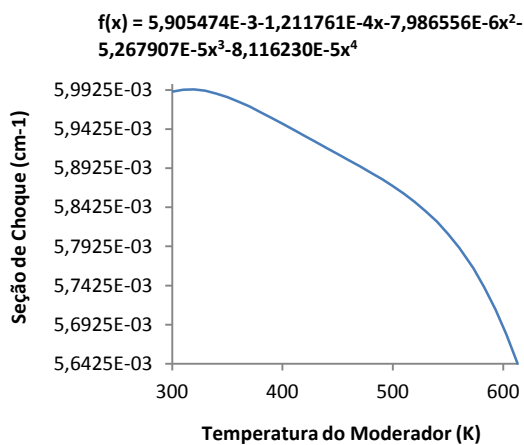


FIG. 11.195 Seção de choque de nu-fissão rápido.

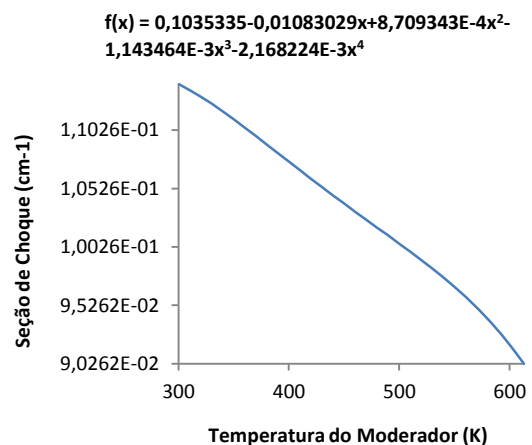


FIG. 11.196 Seção de choque de nu-fissão térmico.

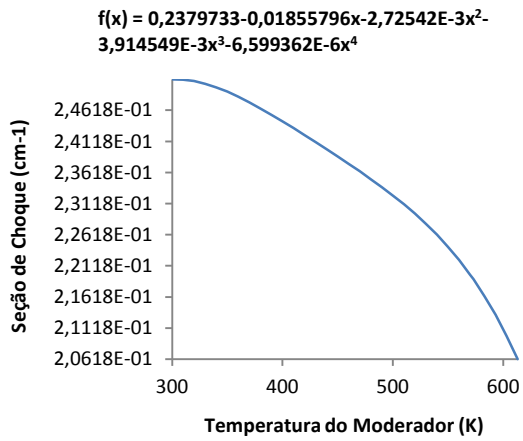


FIG. 11.197 Seção de choque de transporte rápido.

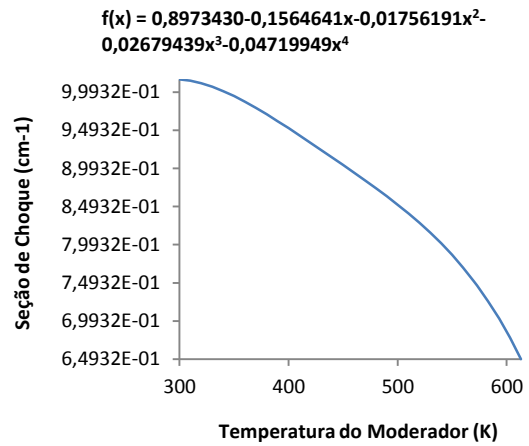


FIG. 11.198 Seção de choque de transporte térmico.

11.4.1.3 PARAMETRIZAÇÃO EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE BORO SOLÚVEL

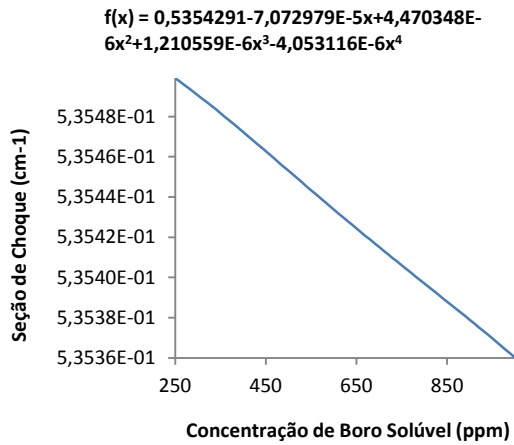


FIG. 11.199 Seção de choque total rápido.

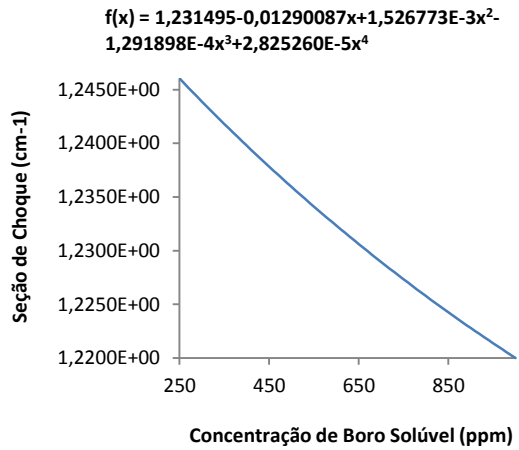


FIG. 11.200 Seção de choque total térmico.

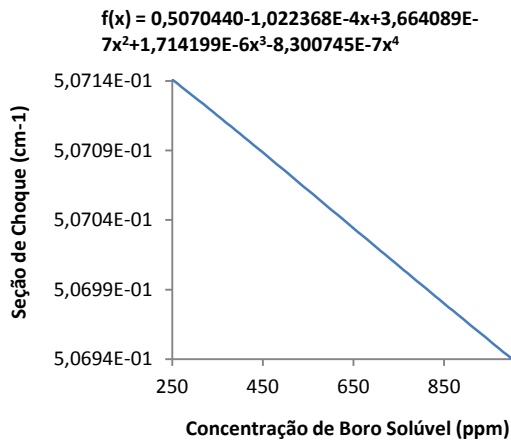


FIG. 11.201 Seção de choque de espalhamento 1-1.

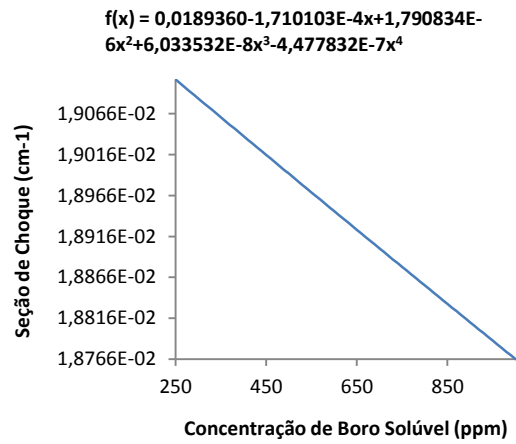


FIG. 11.202 Seção de choque de espalhamento 1-2.

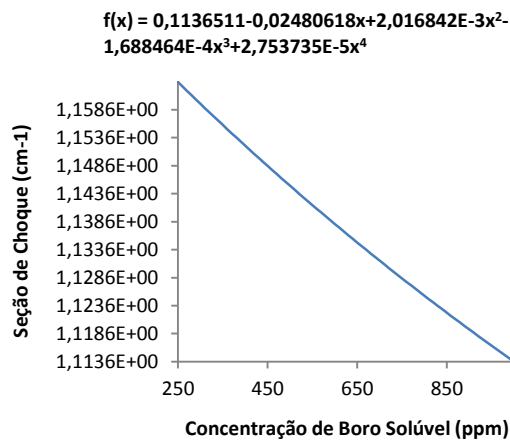


FIG. 11.203 Seção de choque de espalhamento 2-2.

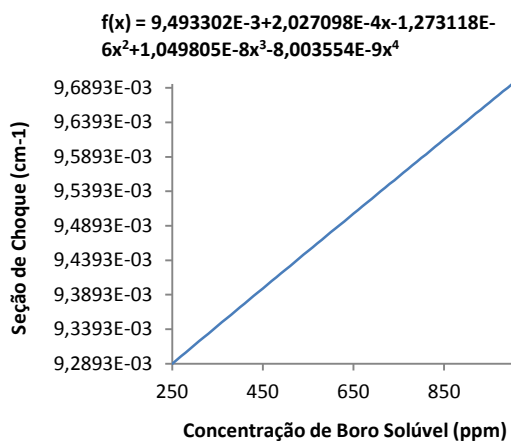


FIG. 11.204 Seção de choque de absorção rápida.

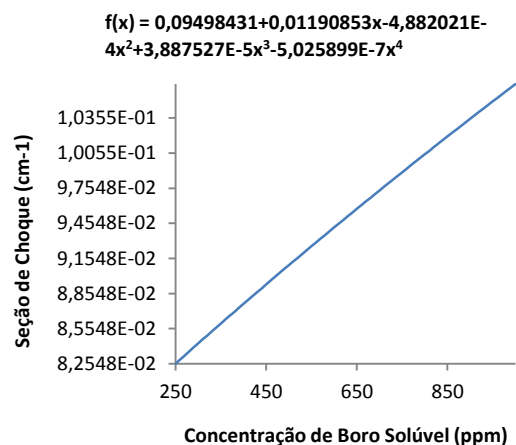


FIG. 11.205 Seção de choque de absorção térmica.

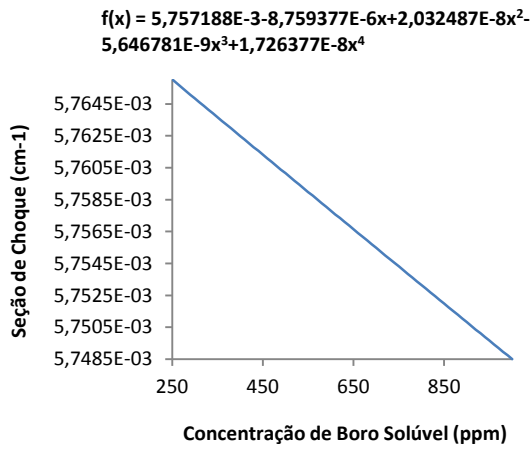


FIG. 11.206 Seção de choque de nu-fissão rápido.

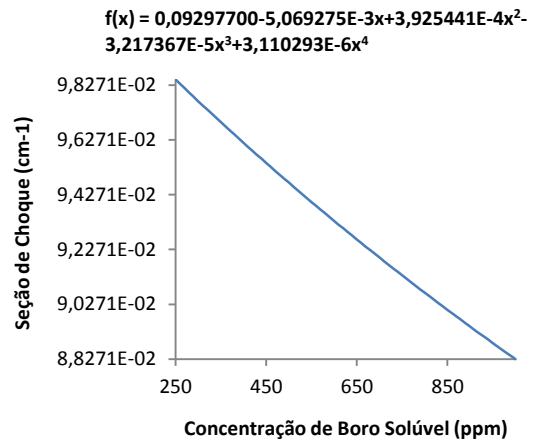


FIG. 11.207 Seção de choque de nu-fissão térmico.

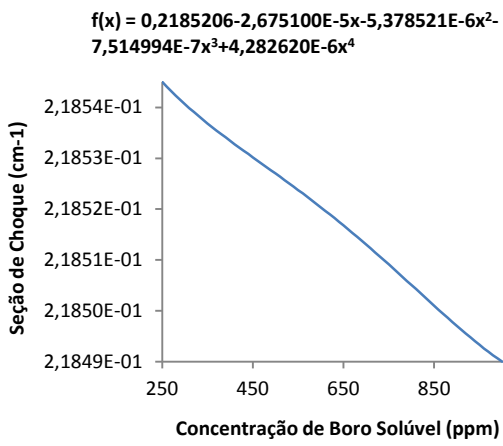


FIG. 11.208 Seção de choque de transporte rápido.

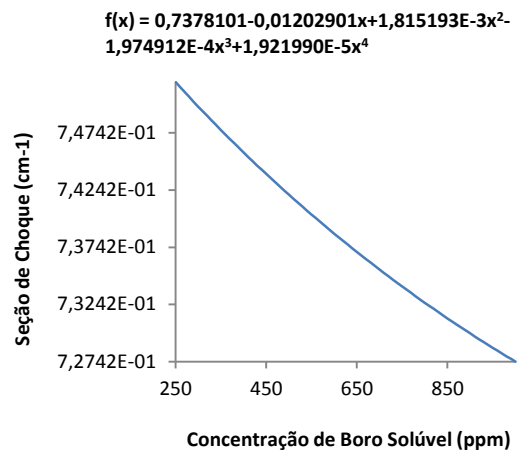


FIG. 11.209 Seção de choque de transporte térmico.

11.4.1.4 PARAMETRIZAÇÃO EM FUNÇÃO DO ENRIQUECIMENTO DE $^{235}_{92}\text{U}$

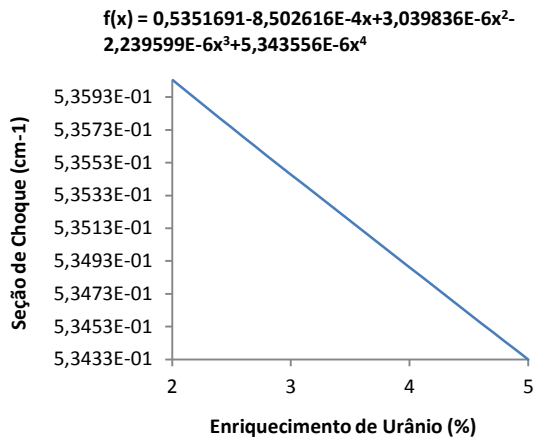


FIG. 11.210 Seção de choque total rápido.

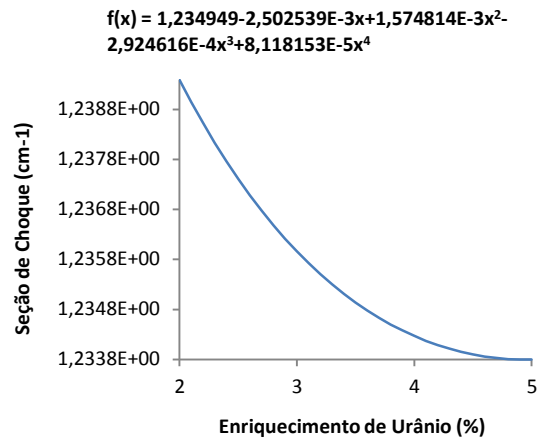


FIG. 11.211 Seção de choque total térmico.

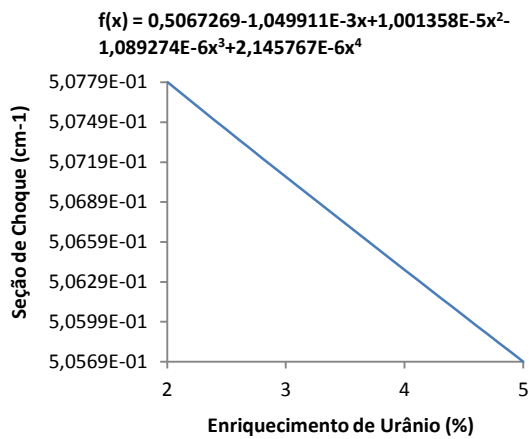


FIG. 11.212 Seção de choque de espalhamento 1-1.

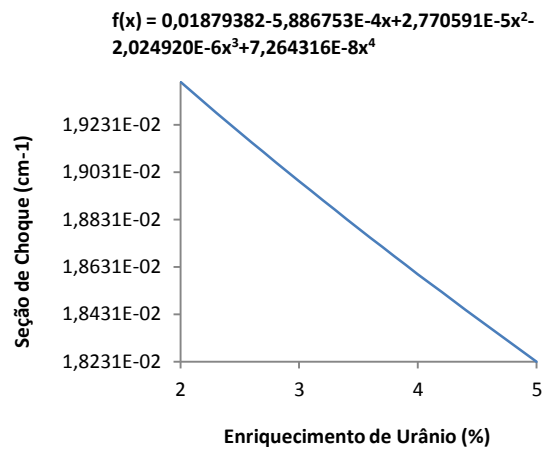


FIG. 11.213 Seção de choque de espalhamento 1-2.

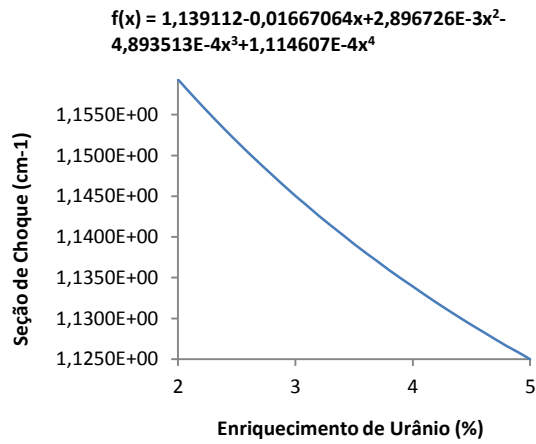


FIG. 11.214 Seção de choque de espalhamento 2-2.

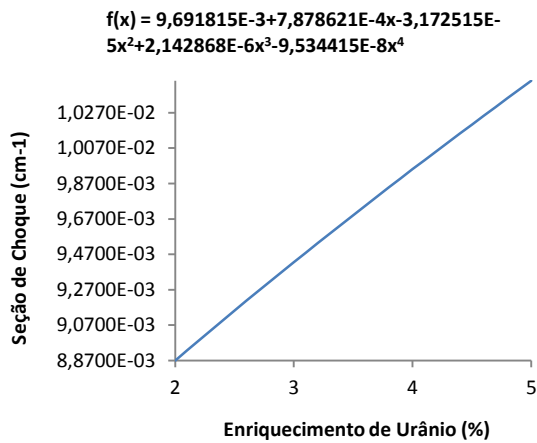


FIG. 11.215 Seção de choque de absorção rápida.

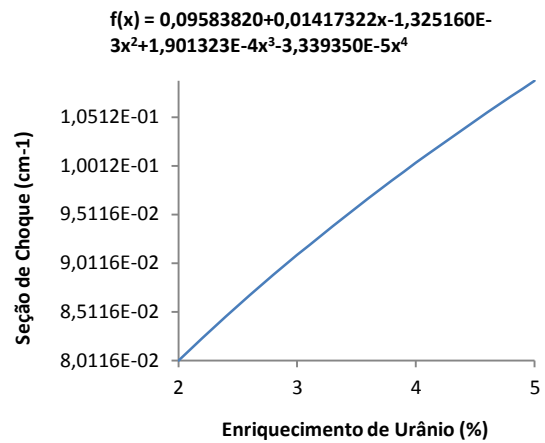


FIG. 11.216 Seção de choque de absorção térmica.

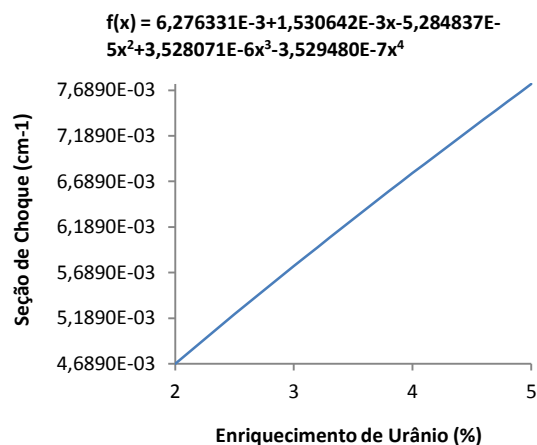


FIG. 11.217 Seção de choque de nu-fissão rápido.

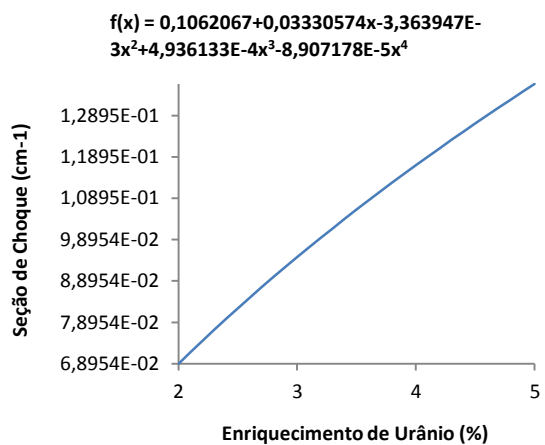


FIG. 11.218 Seção de choque de nu-fissão térmico.

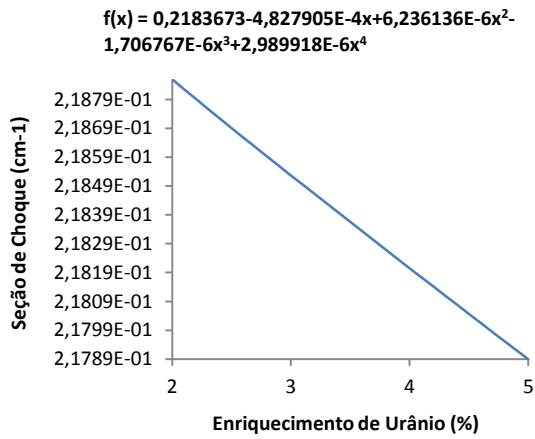


FIG. 11.219 Seção de choque de transporte rápido.

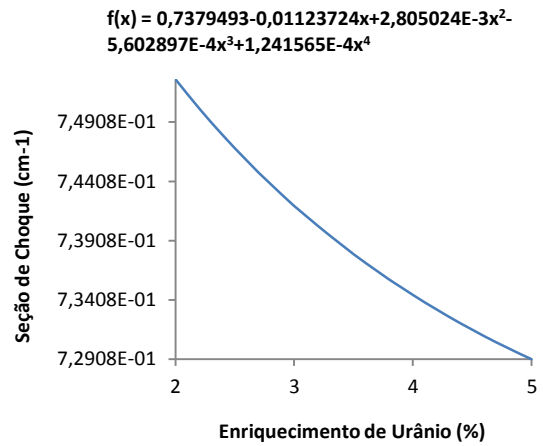


FIG. 11.220 Seção de choque de transporte térmico.

11.4.2 CICLO 1

11.4.2.1 PARAMETRIZAÇÃO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DO COMBUSTÍVEL

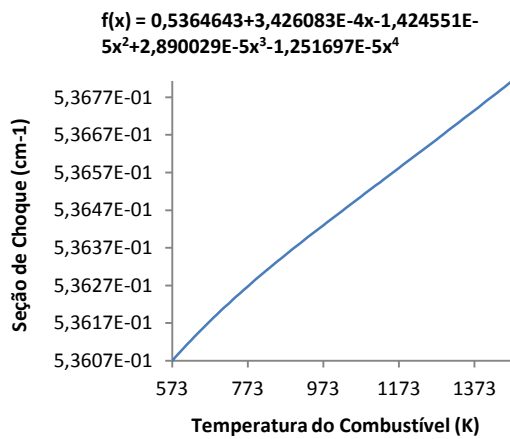


FIG. 11.221 Seção de choque total rápido.

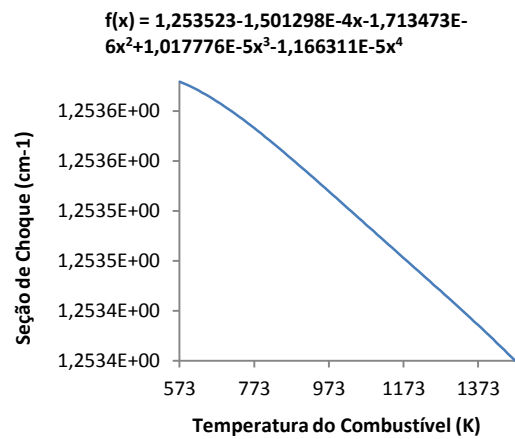


FIG. 11.222 Seção de choque total térmico.

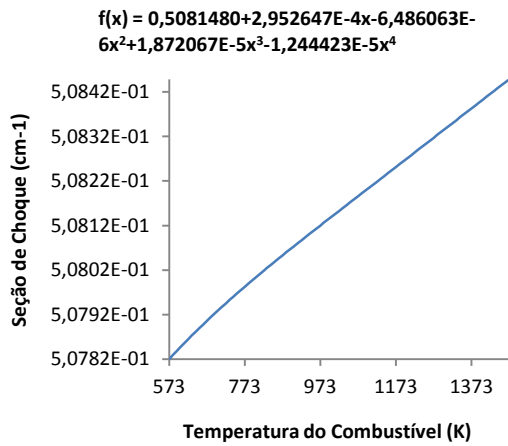


FIG. 11.223 Seção de choque de espalhamento 1-1.

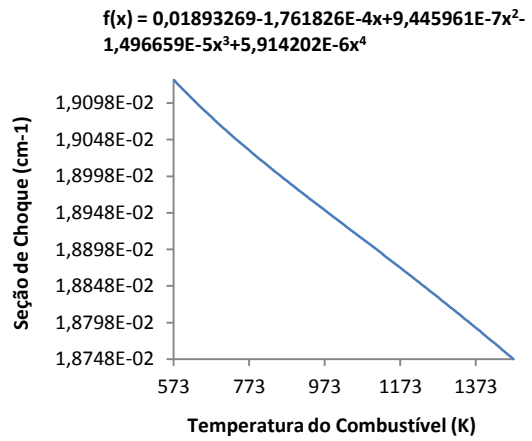


FIG. 11.224 Seção de choque de espalhamento 1-2.

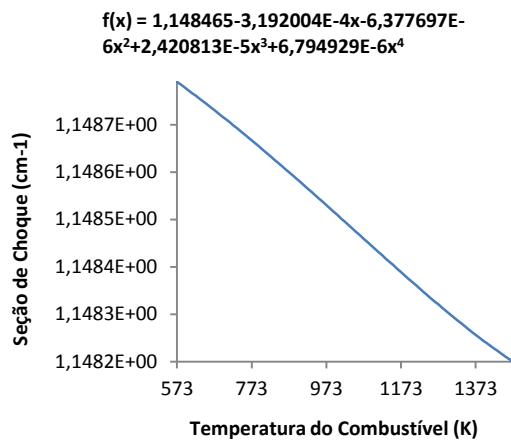


FIG. 11.225 Seção de choque de espalhamento 2-2.

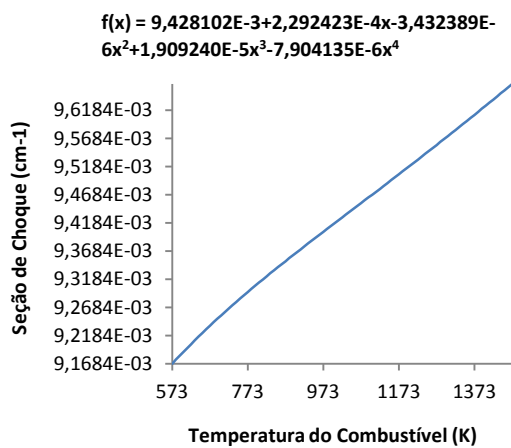


FIG. 11.226 Seção de choque de absorção rápida.

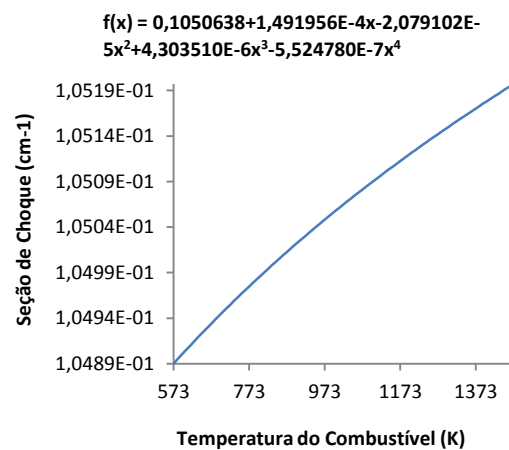


FIG. 11.227 Seção de choque de absorção térmica.

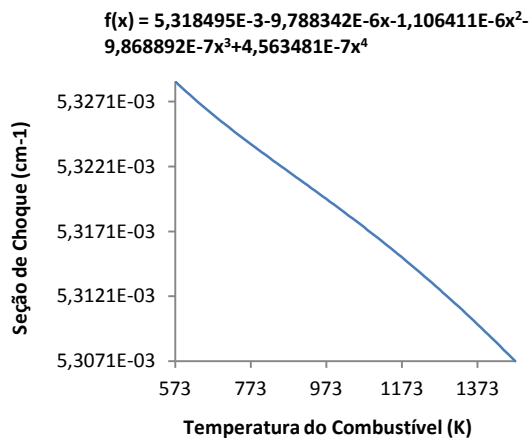


FIG. 11.228 Seção de choque de nu-fissão rápido.

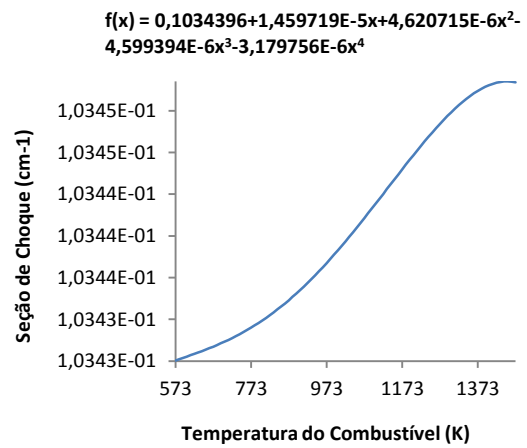


FIG. 11.229 Seção de choque de nu-fissão térmico.

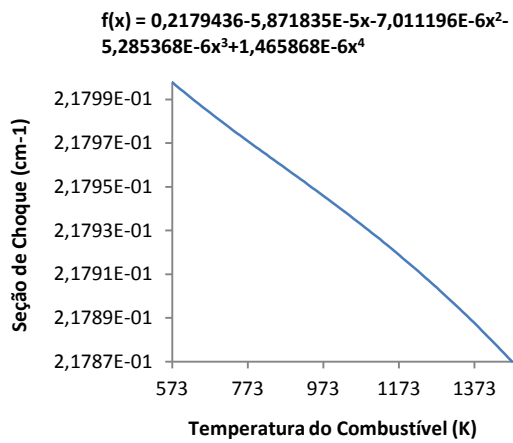


FIG. 11.230 Seção de choque de transporte rápido.

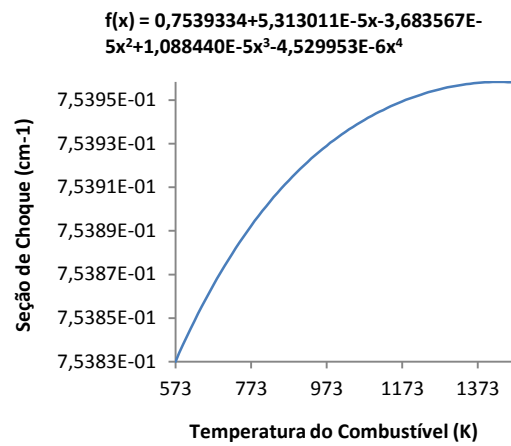


FIG. 11.231 Seção de choque de transporte térmico.

11.4.2.2 PARAMETRIZAÇÃO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA E DENSIDADE DO MODERADOR

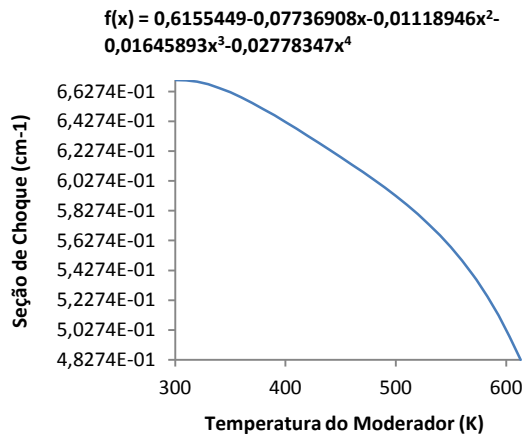


FIG. 11.232 Seção de choque total rápido.

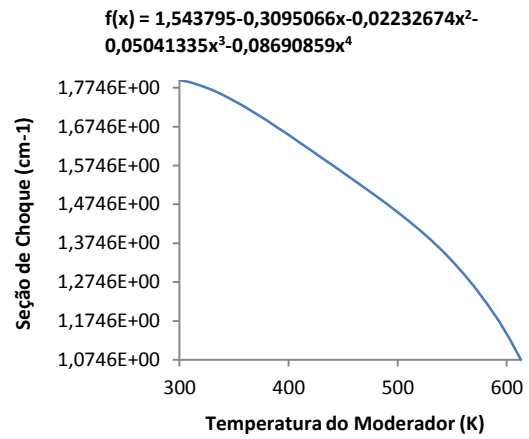


FIG. 11.233 Seção de choque total térmico.

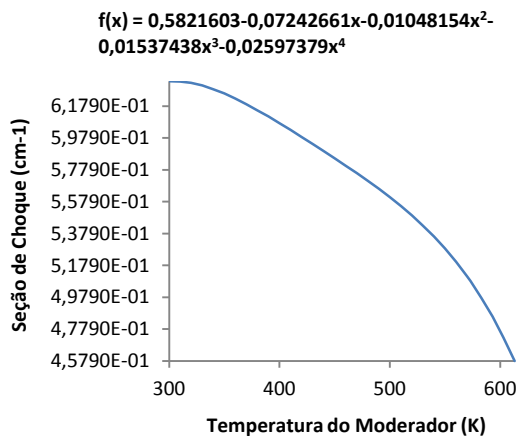


FIG. 11.234 Seção de choque de espalhamento 1-1.

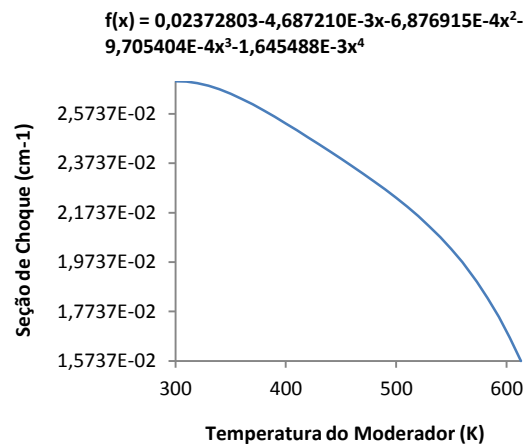


FIG. 11.235 Seção de choque de espalhamento 1-2.

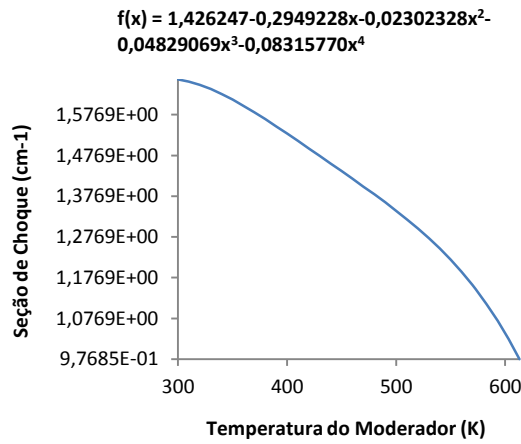


FIG. 11.236 Seção de choque de espalhamento 2-2.

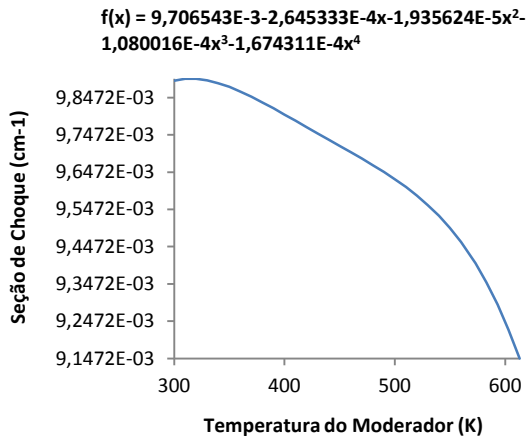


FIG. 11.237 Seção de choque de absorção rápida.

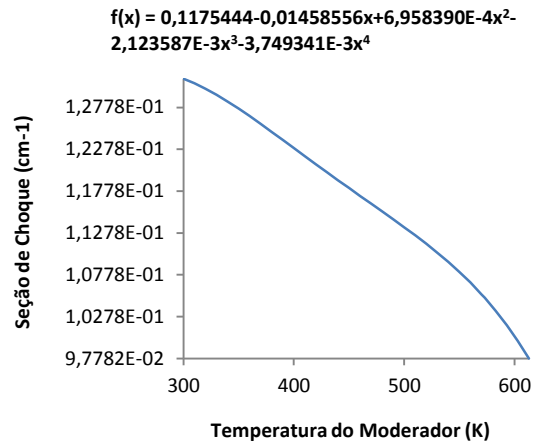


FIG. 11.238 Seção de choque de absorção térmica.

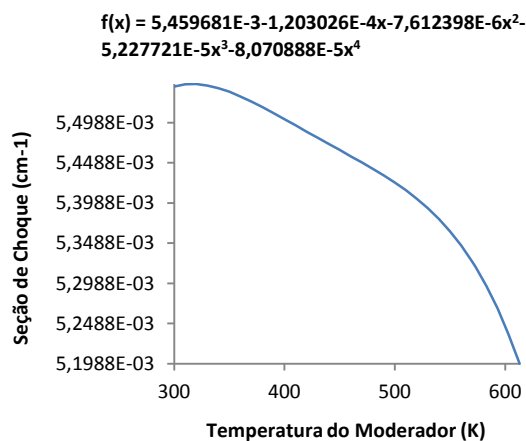


FIG. 11.239 Seção de choque de nu-fissão rápido.

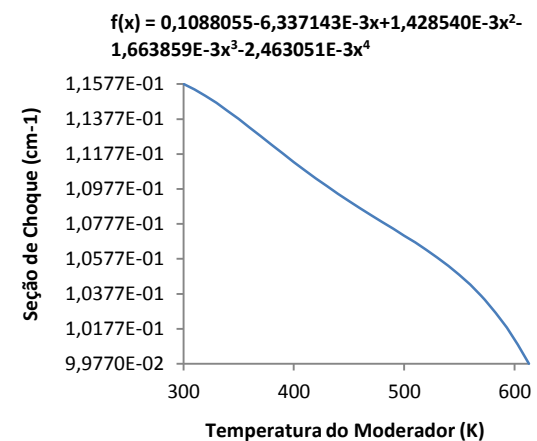


FIG. 11.240 Seção de choque de nu-fissão térmico.

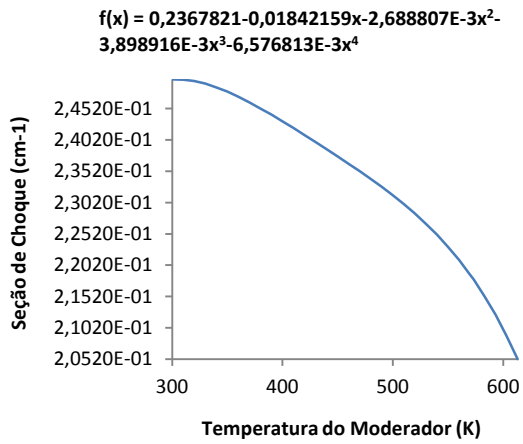


FIG. 11.241 Seção de choque de transporte rápido.

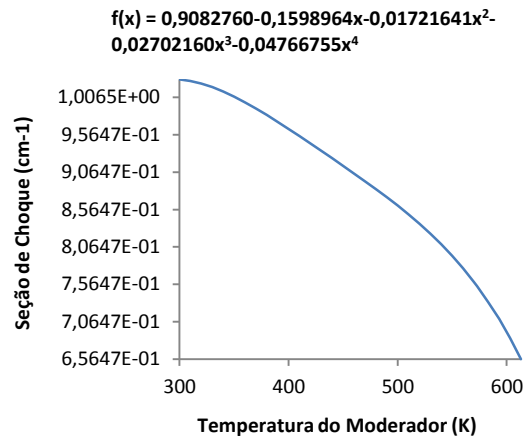


FIG. 11.242 Seção de choque de transporte térmico.

11.4.2.3 PARAMETRIZAÇÃO EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE BORO SOLÚVEL

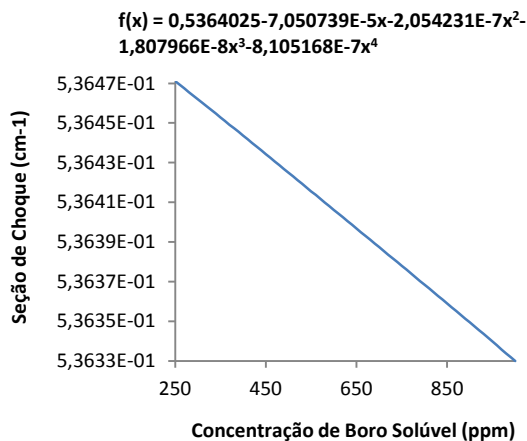


FIG. 11.243 Seção de choque total rápido.

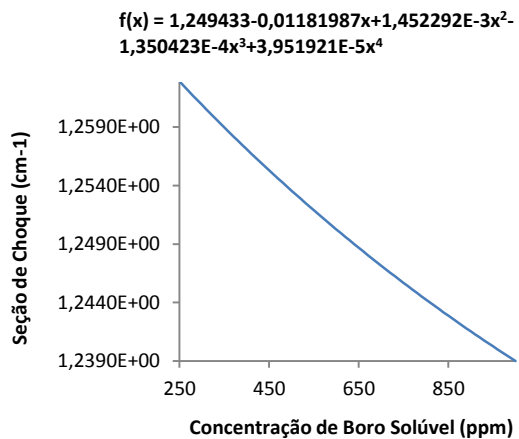


FIG. 11.244 Seção de choque total térmico.

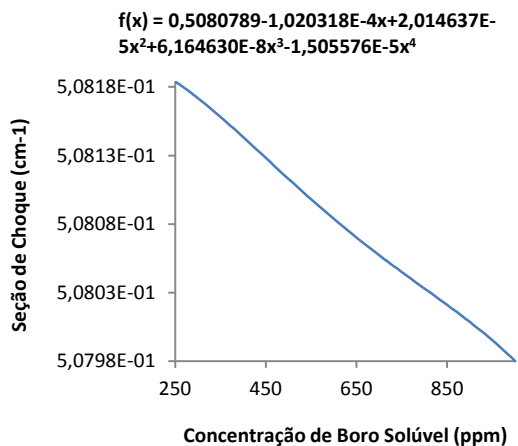


FIG. 11.245 Seção de choque de espalhamento 1-1.

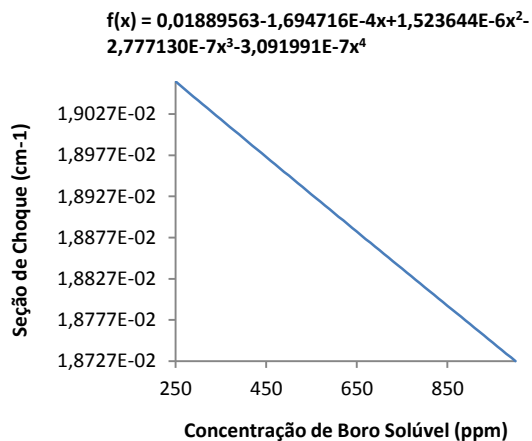


FIG. 11.246 Seção de choque de espalhamento 1-2.

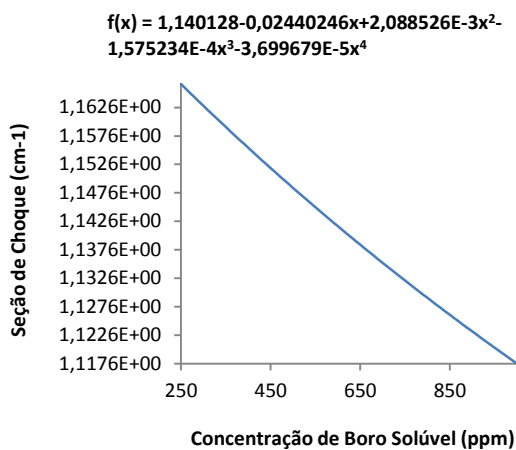


FIG. 11.247 Seção de choque de espalhamento 2-2.

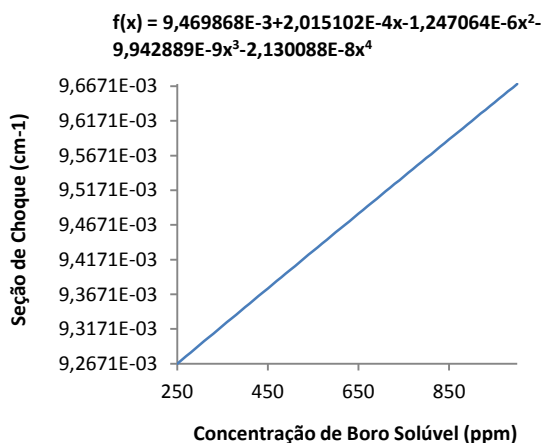


FIG. 11.248 Seção de choque de absorção rápida.

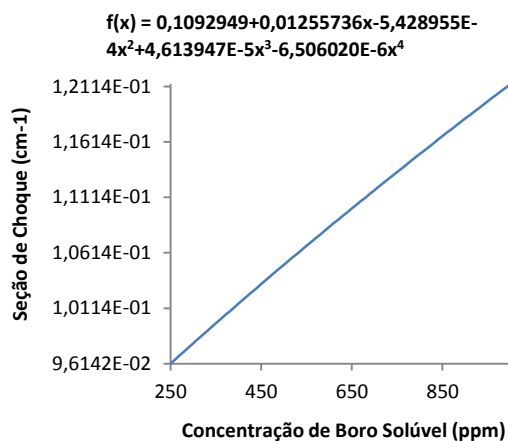


FIG. 11.249 Seção de choque de absorção térmica.

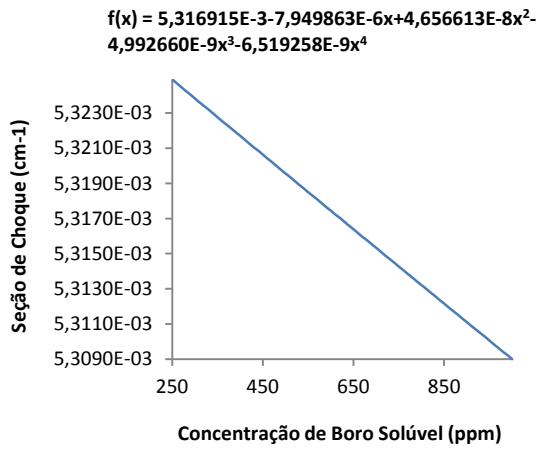


FIG. 11.250 Seção de choque de nu-fissão rápido.

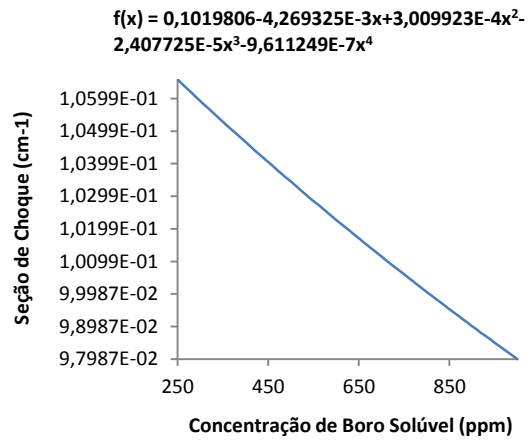


FIG. 11.251 Seção de choque de nu-fissão térmico.

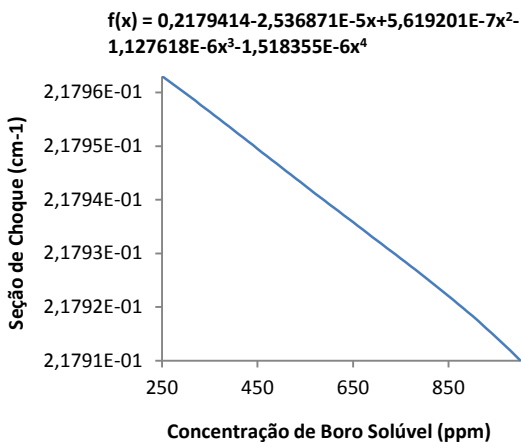


FIG. 11.252 Seção de choque de transporte rápido.

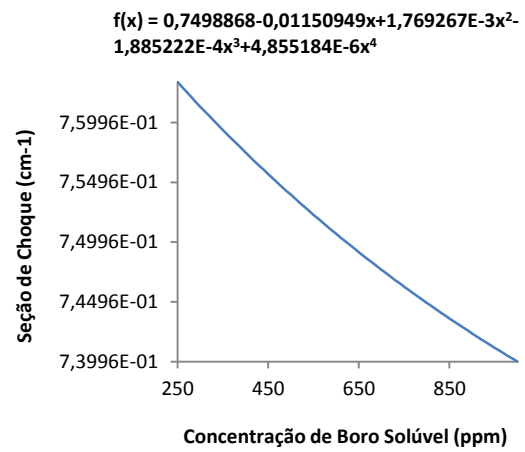


FIG. 11.253 Seção de choque de transporte térmico.

11.4.2.4 PARAMETRIZAÇÃO EM FUNÇÃO DO ENRIQUECIMENTO DE $^{235}_{92}\text{U}$

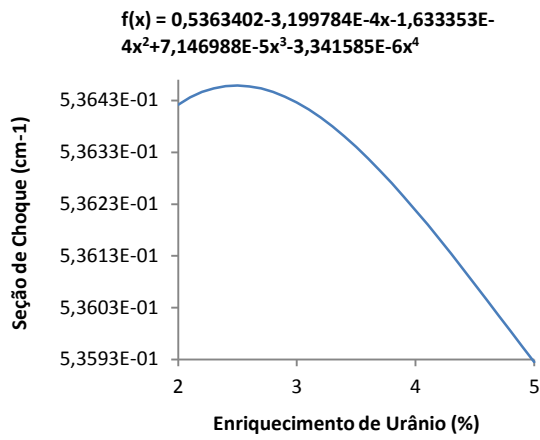


FIG. 11.254 Seção de choque total rápido.

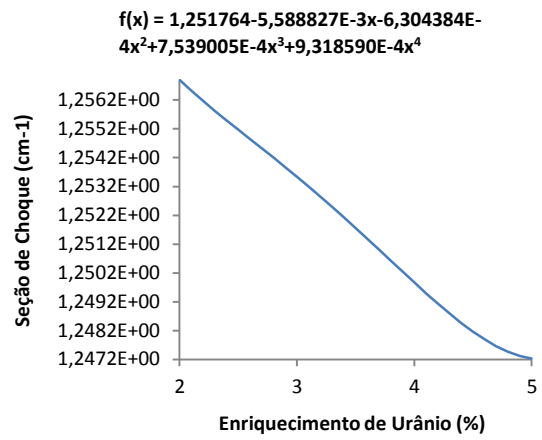


FIG. 11.255 Seção de choque total térmico.

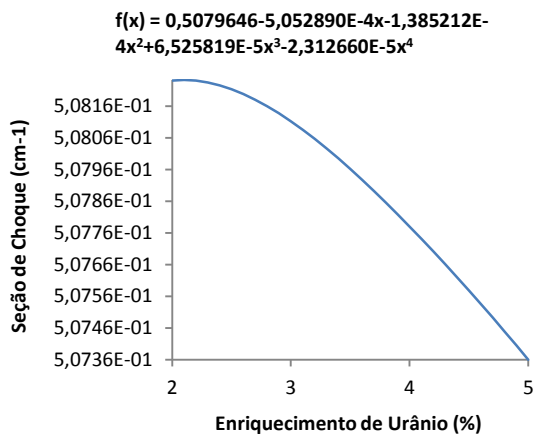


FIG. 11.256 Seção de choque de espalhamento 1-1.

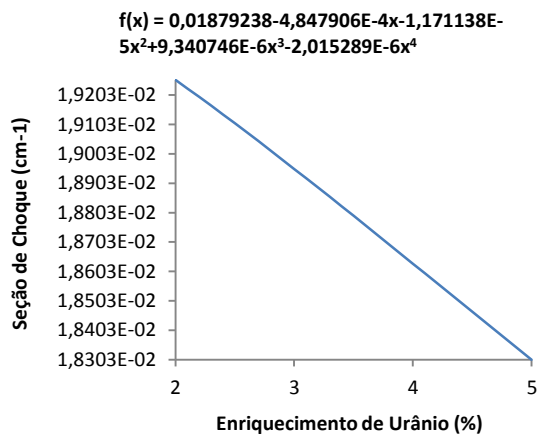


FIG. 11.257 Seção de choque de espalhamento 1-2.

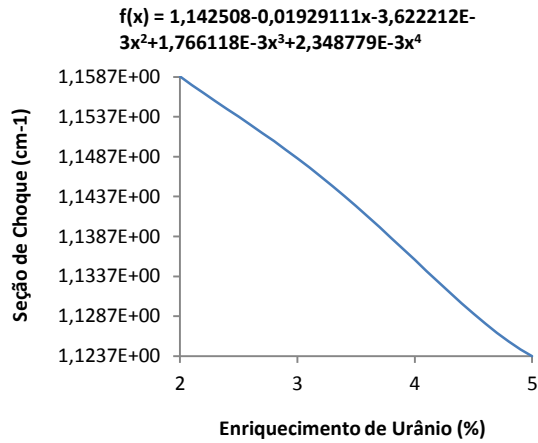


FIG. 11.258 Seção de choque de espalhamento 2-2.

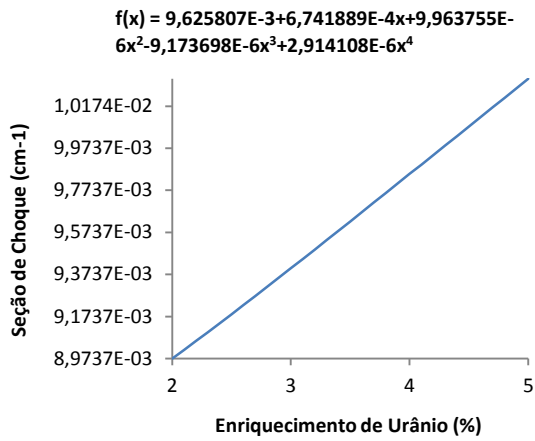


FIG. 11.259 Seção de choque de absorção rápida.

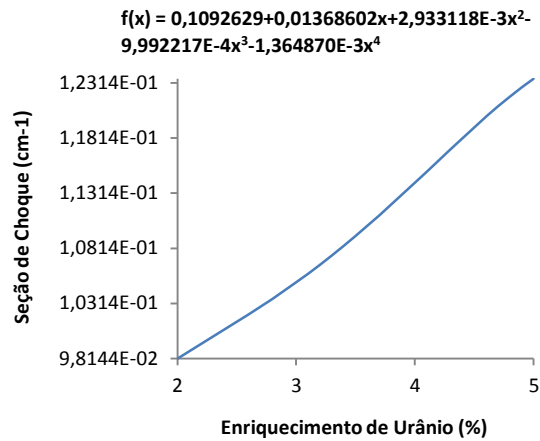


FIG. 11.260 Seção de choque de absorção térmica.

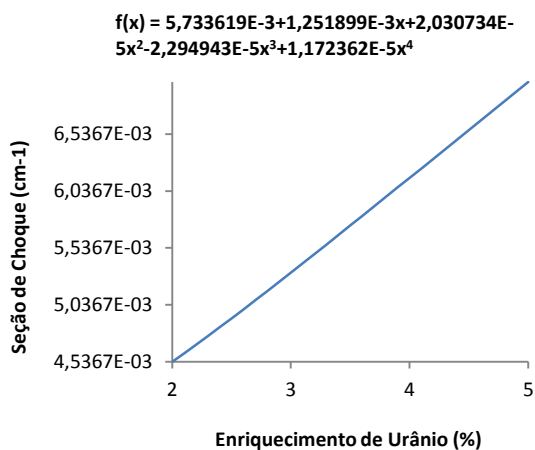


FIG. 11.261 Seção de choque de nu-fissão rápido.

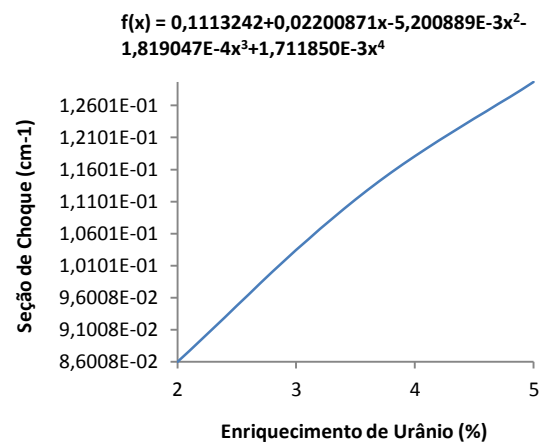


FIG. 11.262 Seção de choque de nu-fissão térmico.

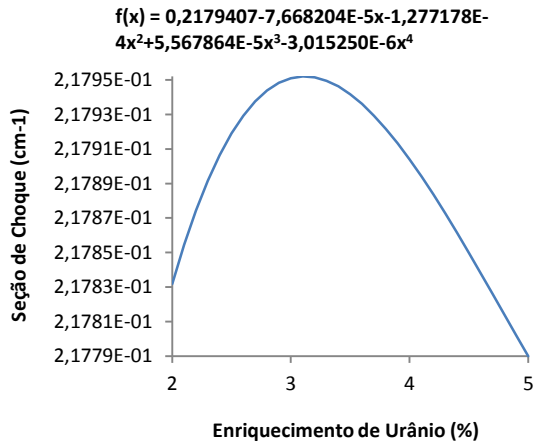


FIG. 11.263 Seção de choque de transporte rápido.

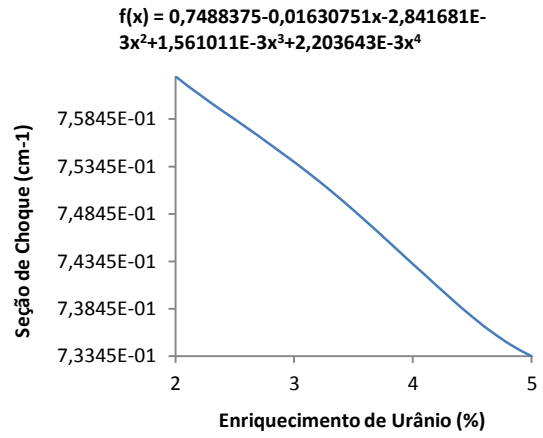


FIG. 11.264 Seção de choque de transporte térmico.

11.4.3 CICLO 2

11.4.3.1 PARAMETRIZAÇÃO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DO COMBUSTÍVEL

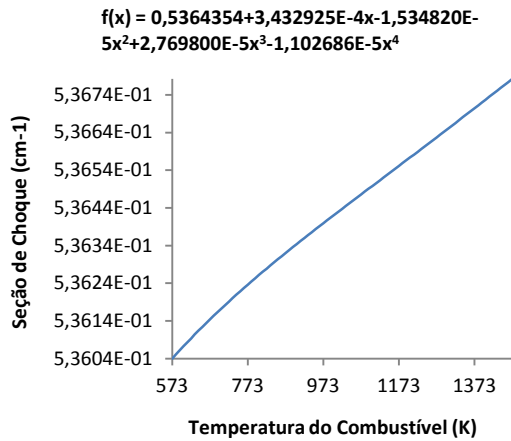


FIG. 11.265 Seção de choque total rápido.

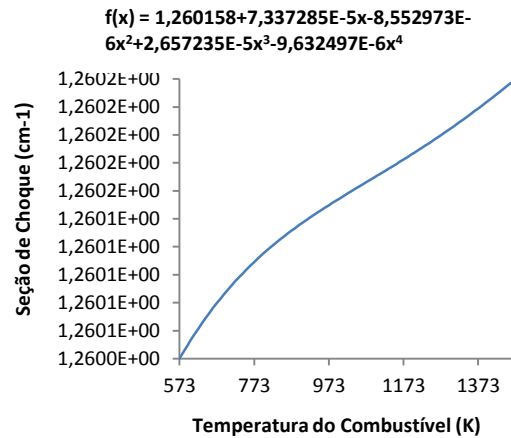


FIG. 11.266 Seção de choque total térmico.

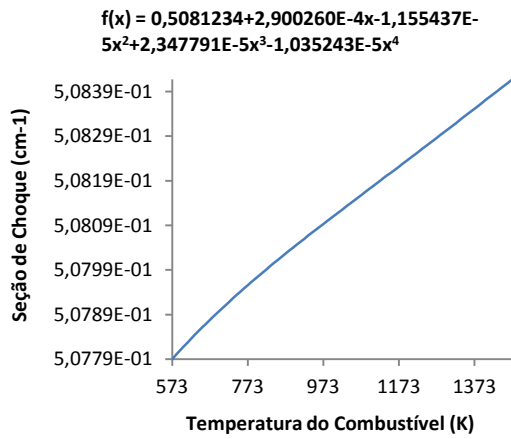


FIG. 11.267 Seção de choque de espalhamento 1-1.

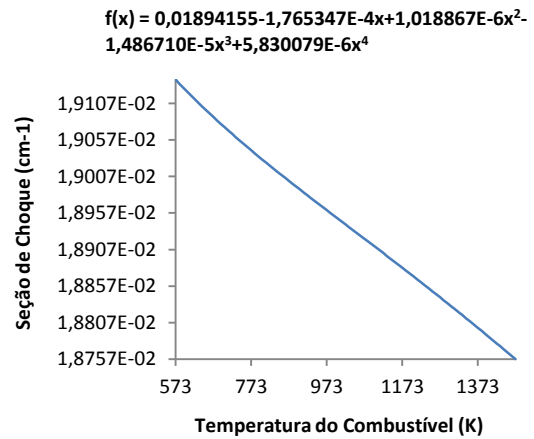


FIG. 11.268 Seção de choque de espalhamento 1-2.

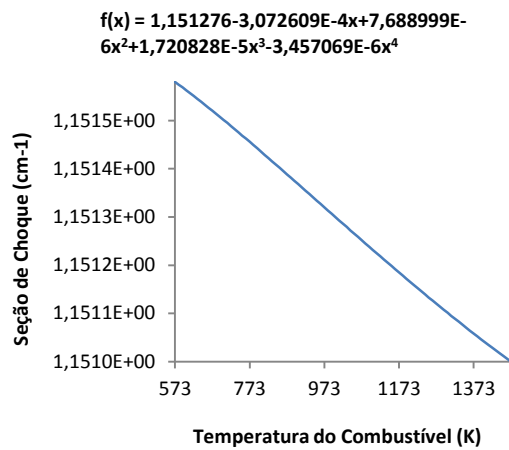


FIG. 11.269 Seção de choque de espalhamento 2-2.

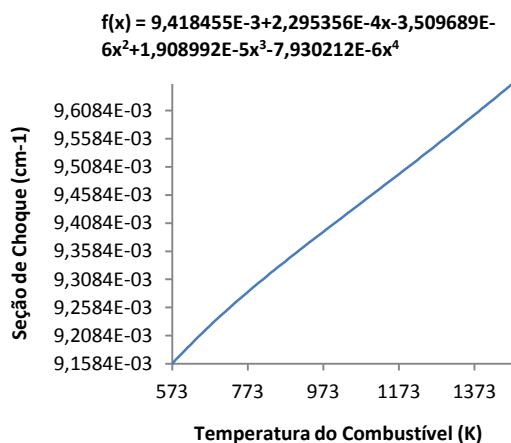


FIG. 11.270 Seção de choque de absorção rápida.

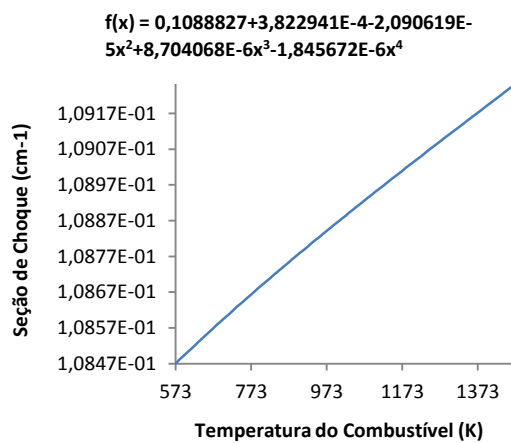


FIG. 11.271 Seção de choque de absorção térmica.

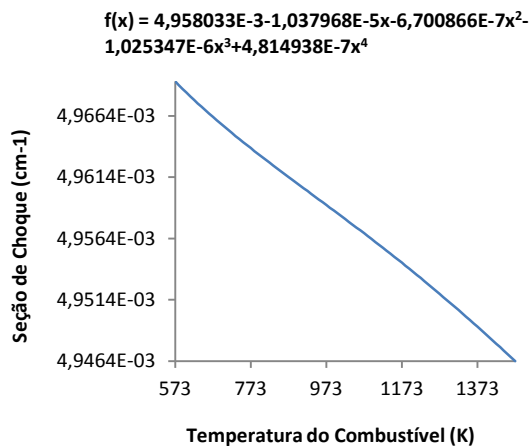


FIG. 11.272 Seção de choque de nu-fissão rápido.

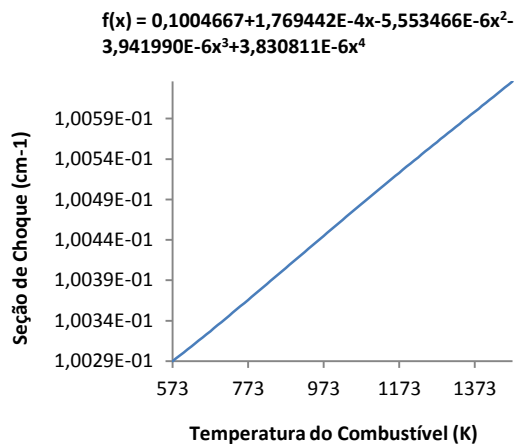


FIG. 11.273 Seção de choque de nu-fissão térmico.

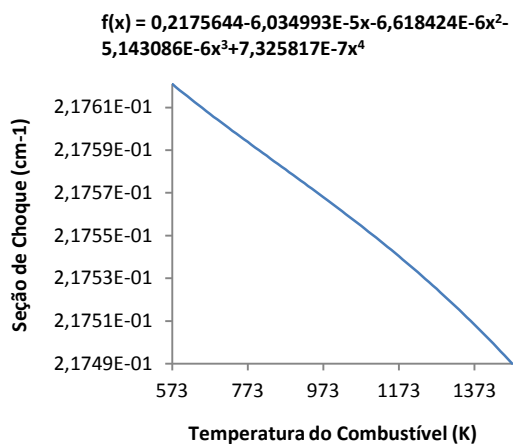


FIG. 11.274 Seção de choque de transporte rápido.

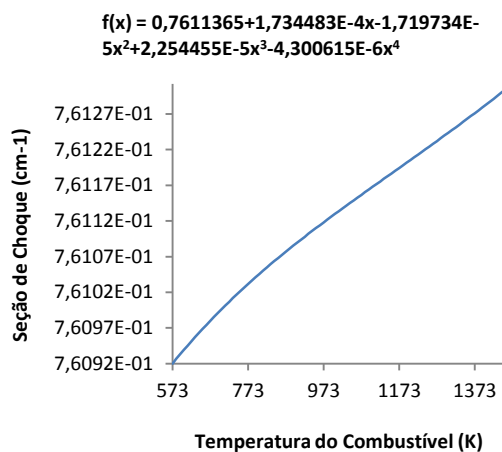


FIG. 11.275 Seção de choque de transporte térmico.

11.4.3.2 PARAMETRIZAÇÃO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA E DENSIDADE DO MODERADOR

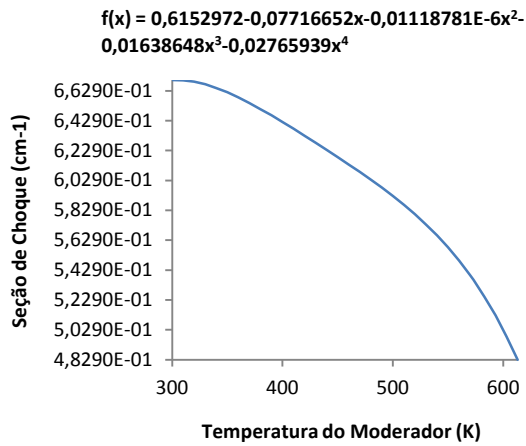


FIG. 11.276 Seção de choque total rápido.

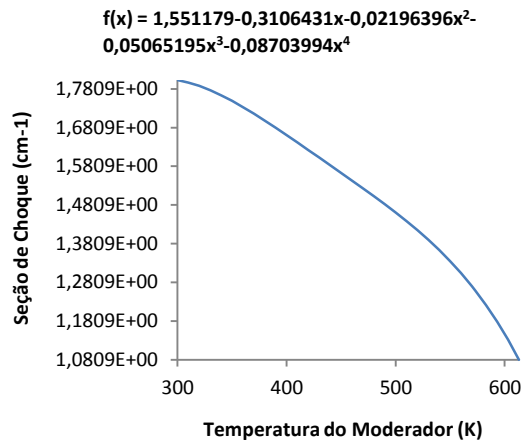


FIG. 11.277 Seção de choque total térmico.

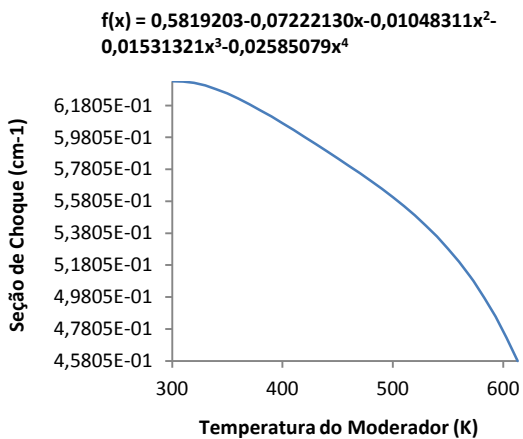


FIG. 11.278 Seção de choque de espalhamento 1-1.

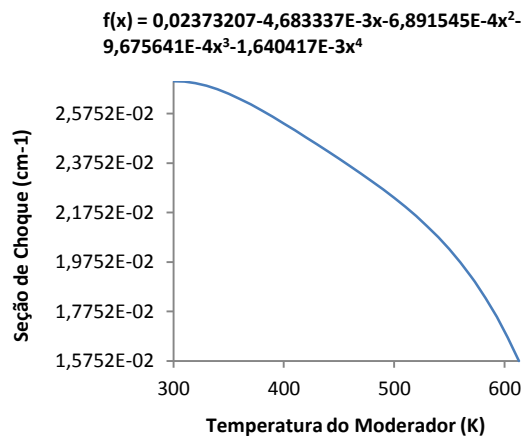


FIG. 11.279 Seção de choque de espalhamento 1-2.

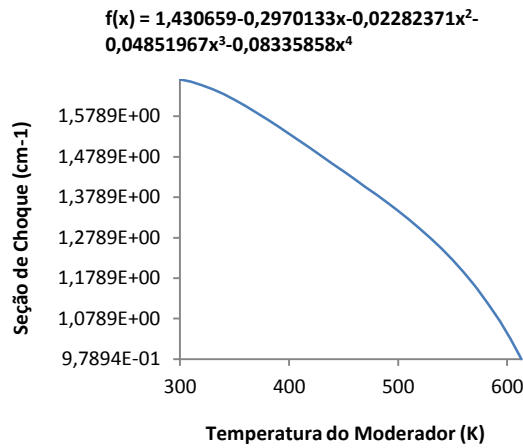


FIG. 11.280 Seção de choque de espalhamento 2-2.

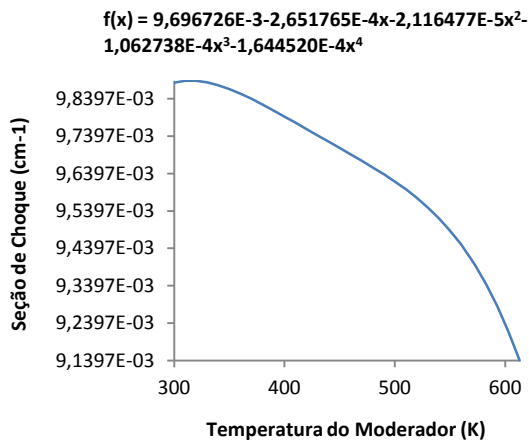


FIG. 11.281 Seção de choque de absorção rápida.

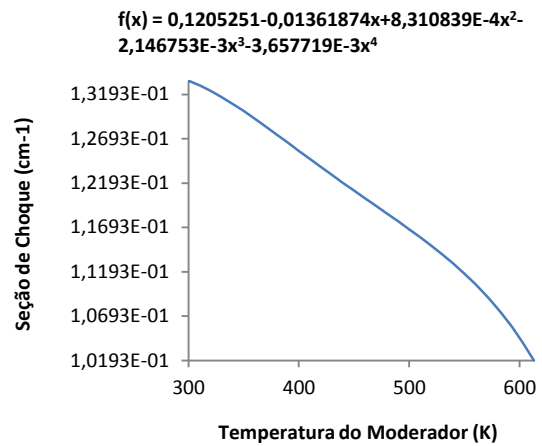


FIG. 11.282 Seção de choque de absorção térmica.

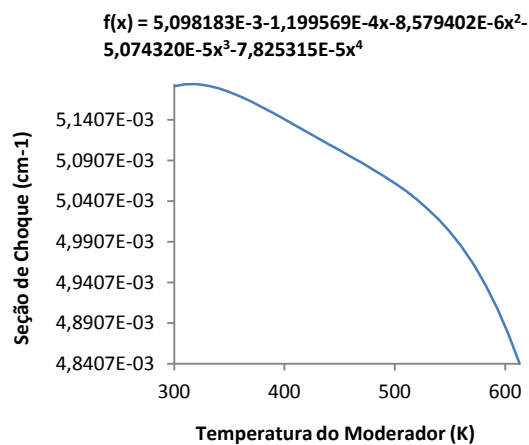


FIG. 11.283 Seção de choque de nu-fissão rápido.

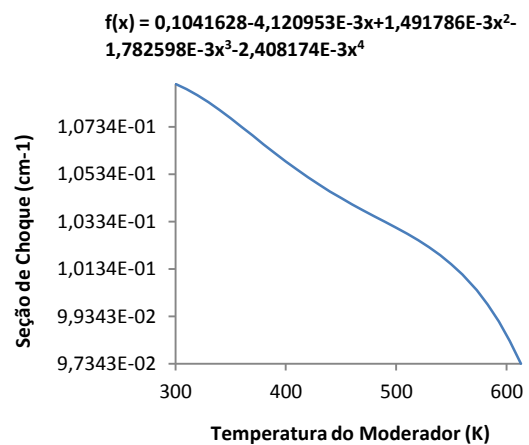


FIG. 11.284 Seção de choque de nu-fissão térmico.

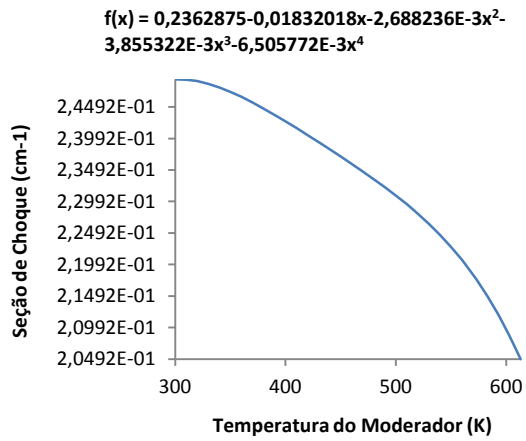


FIG. 11.285 Seção de choque de transporte rápido.

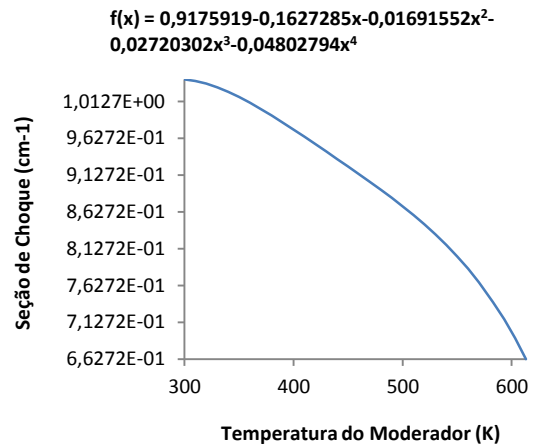


FIG. 11.286 Seção de choque de transporte térmico.

11.4.3.3 PARAMETRIZAÇÃO EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE BORO SOLÚVEL

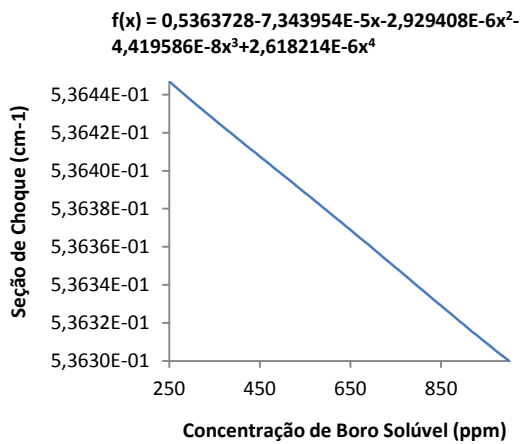


FIG. 11.287 Seção de choque total rápido.

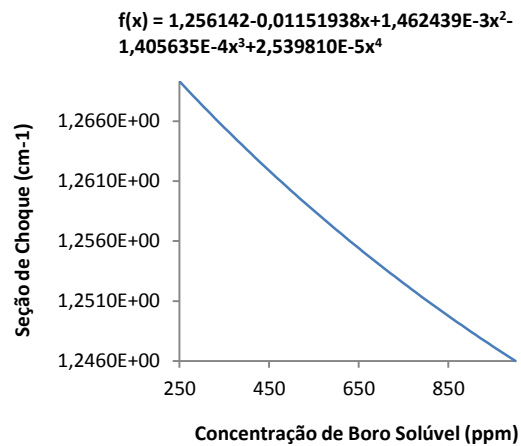


FIG. 11.288 Seção de choque total térmico.

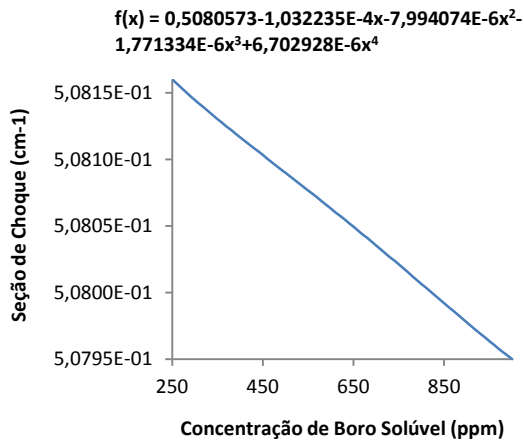


FIG. 11.289 Seção de choque de espalhamento 1-1.

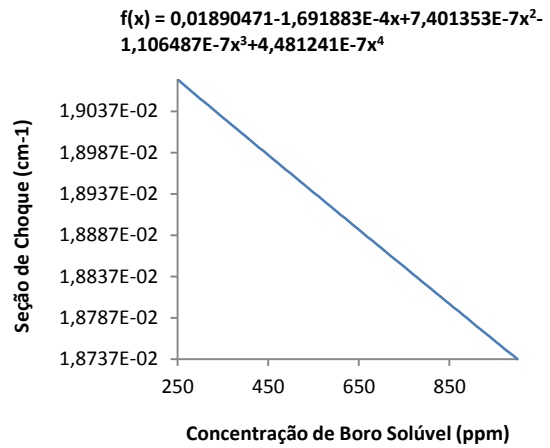


FIG. 11.290 Seção de choque de espalhamento 1-2.

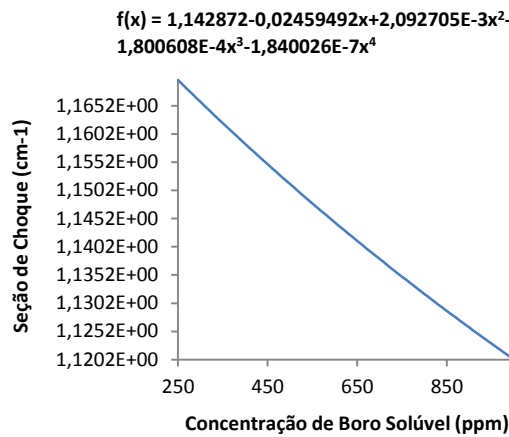


FIG. 11.291 Seção de choque de espalhamento 2-2.

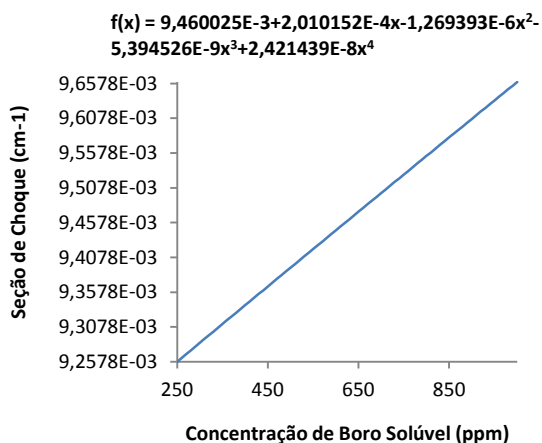


FIG. 11.292 Seção de choque de absorção rápida.

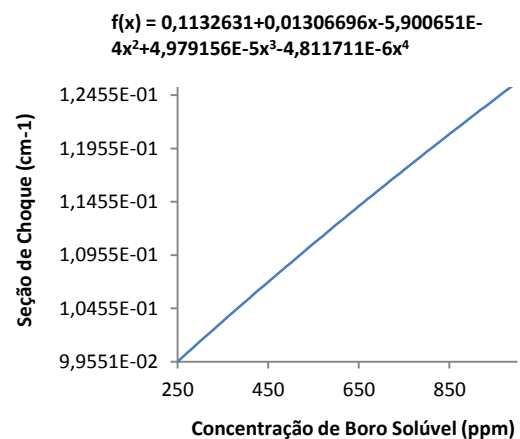


FIG. 11.293 Seção de choque de absorção térmica.

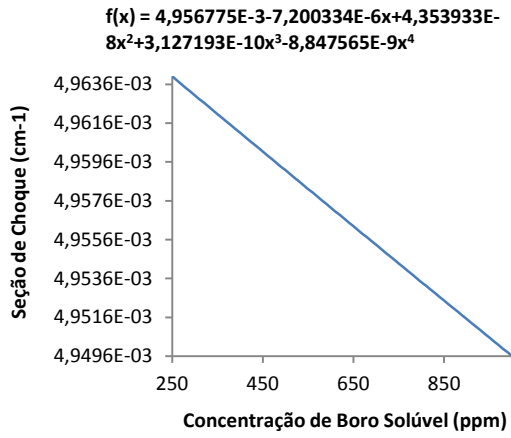


FIG. 11.294 Seção de choque de nu-fissão rápido.

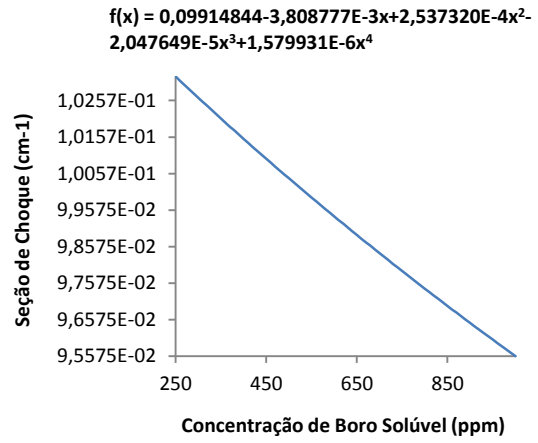


FIG. 11.295 Seção de choque de nu-fissão térmico.

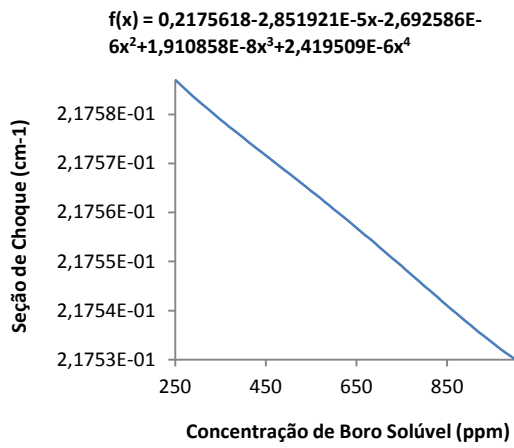


FIG. 11.296 Seção de choque de transporte rápido.

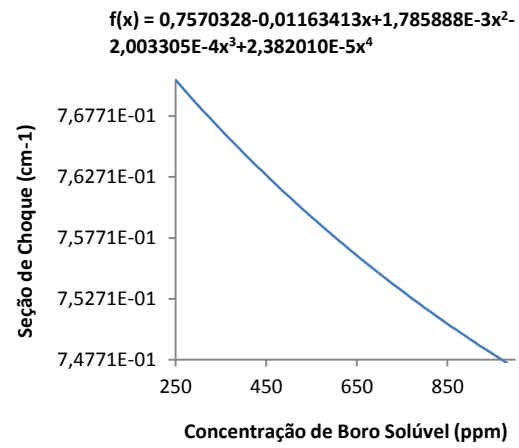


FIG. 11.297 Seção de choque de transporte térmico.

11.4.3.4 PARAMETRIZAÇÃO EM FUNÇÃO DO ENRIQUECIMENTO DE $^{235}_{92}\text{U}$

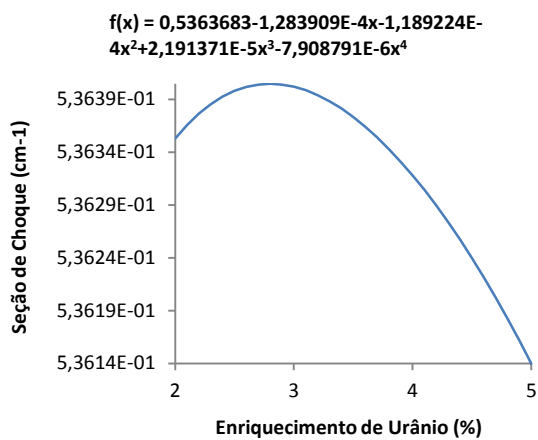


FIG. 11.298 Seção de choque total rápido.

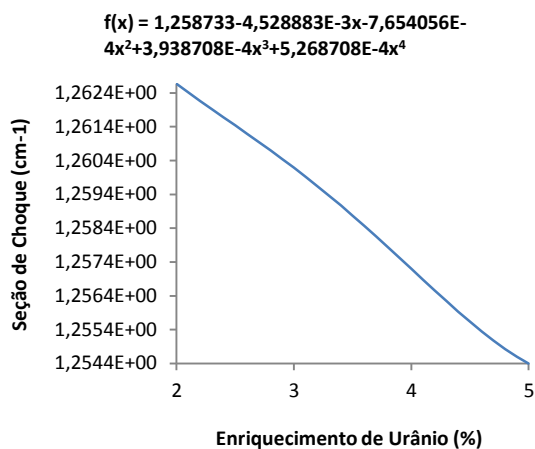


FIG. 11.299 Seção de choque total térmico.

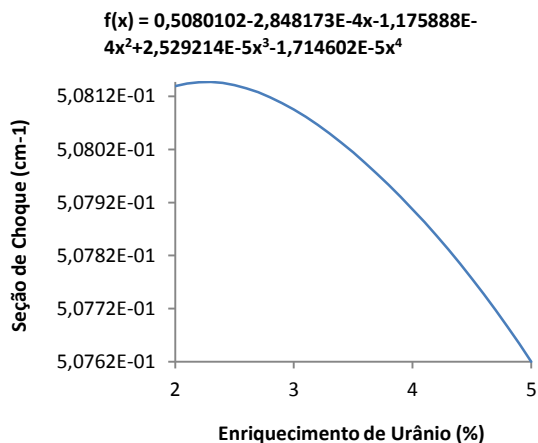


FIG. 11.300 Seção de choque de espalhamento 1-1.

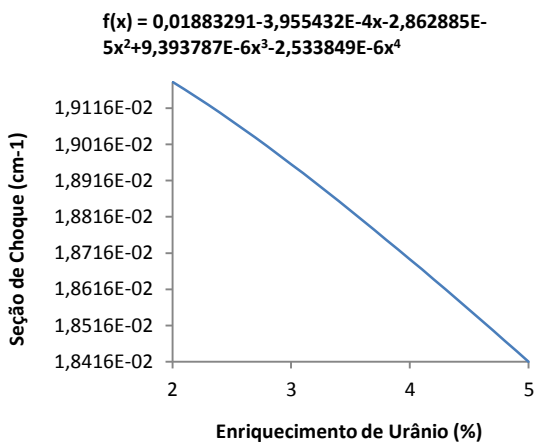


FIG. 11.301 Seção de choque de espalhamento 1-2.

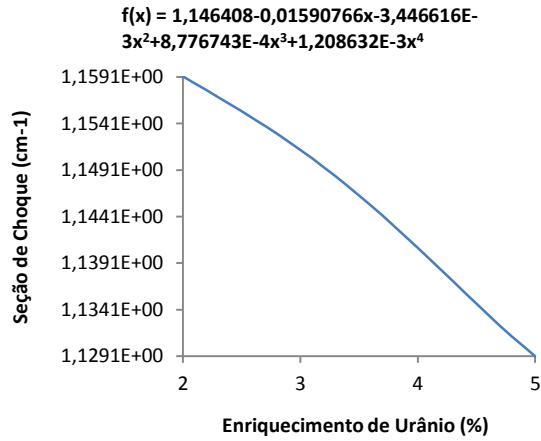


FIG. 11.302 Seção de choque de espalhamento 2-2.

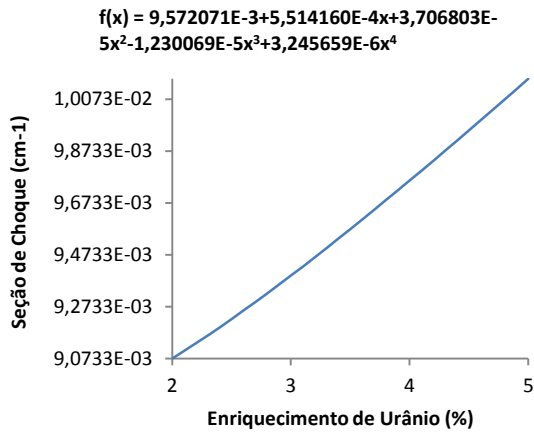


FIG. 11.303 Seção de choque de absorção rápida.

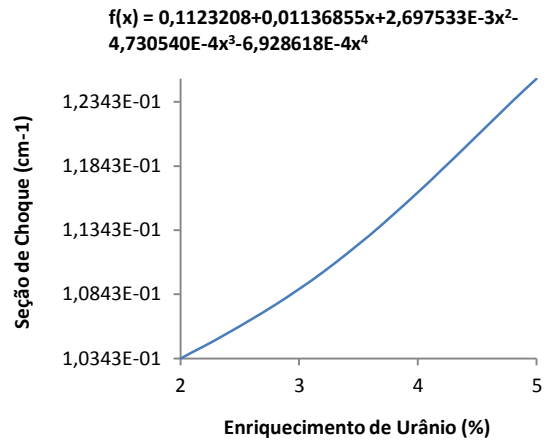


FIG. 11.304 Seção de choque de absorção térmica.

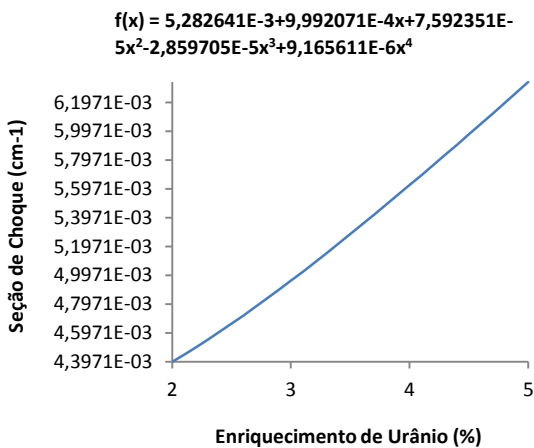


FIG. 11.305 Seção de choque de nu-fissão rápido.

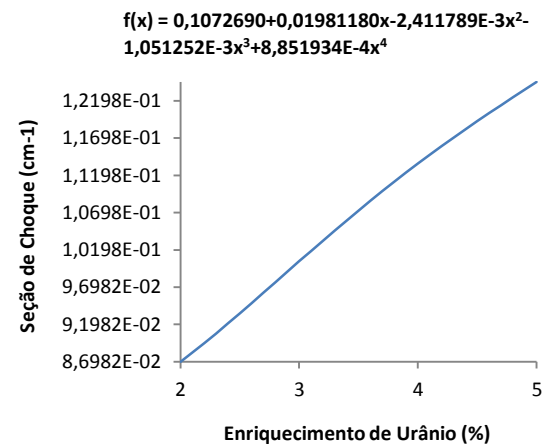


FIG. 11.306 Seção de choque de nu-fissão térmico.

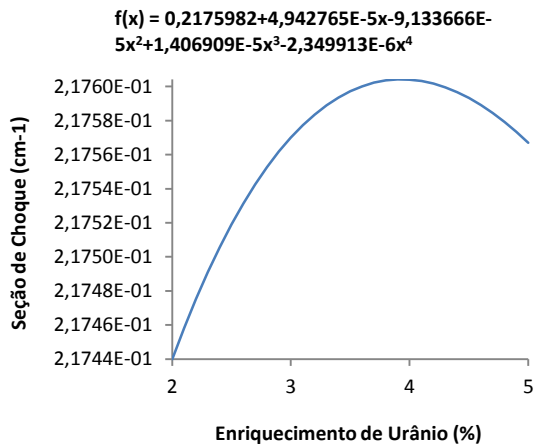


FIG. 11.307 Seção de choque de transporte rápido.

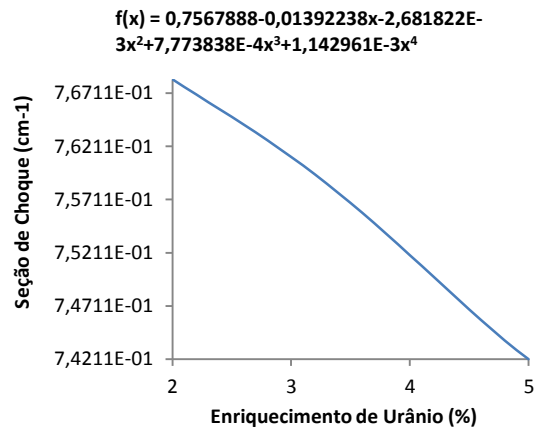


FIG. 11.308 Seção de choque de transporte térmico.

11.4.4 CICLO 3

11.4.4.1 PARAMETRIZAÇÃO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DO COMBUSTÍVEL

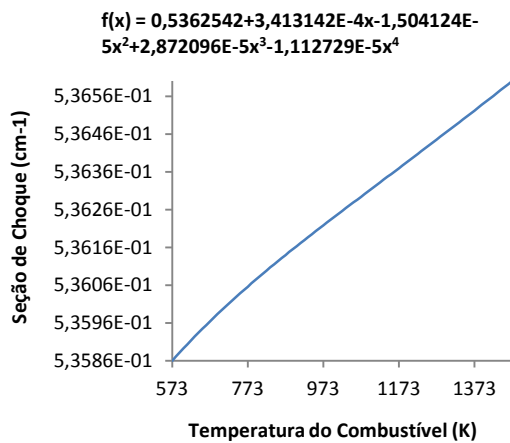


FIG. 11.309 Seção de choque total rápido.

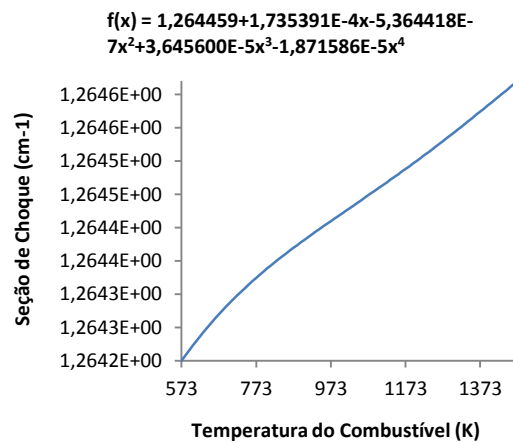


FIG. 11.310 Seção de choque total térmico.

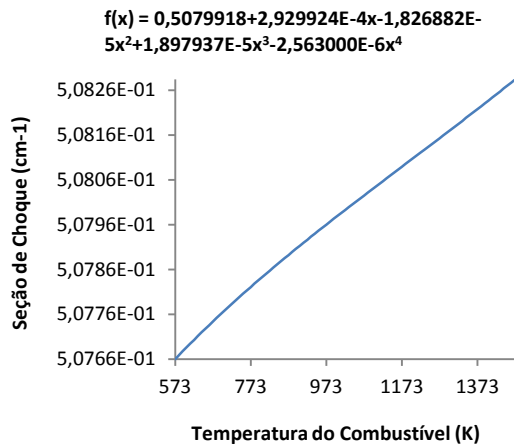


FIG. 11.311 Seção de choque de espalhamento 1-1.

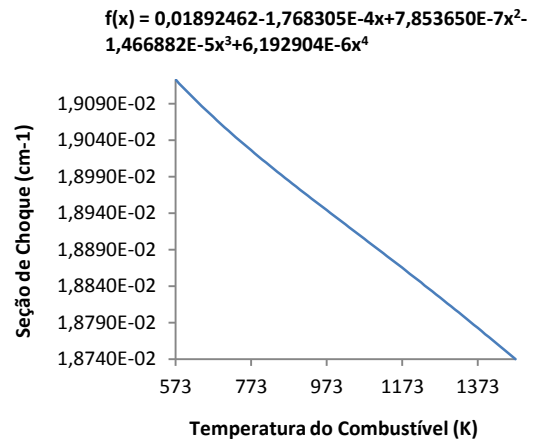


FIG. 11.312 Seção de choque de espalhamento 1-2.

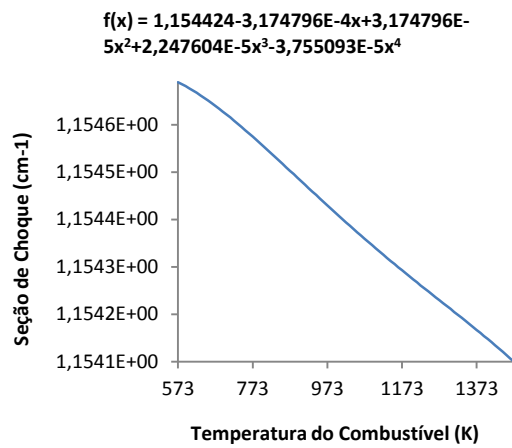


FIG. 11.313 Seção de choque de espalhamento 2-2.

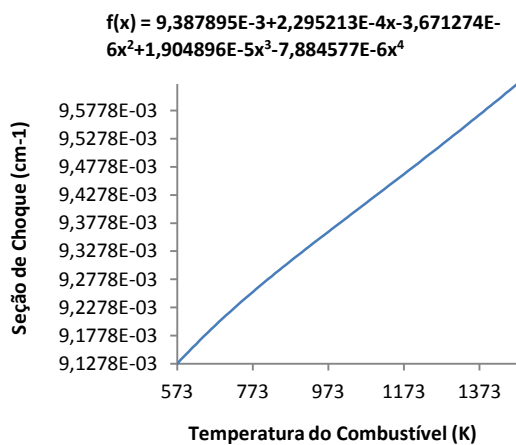


FIG. 11.314 Seção de choque de absorção rápida.

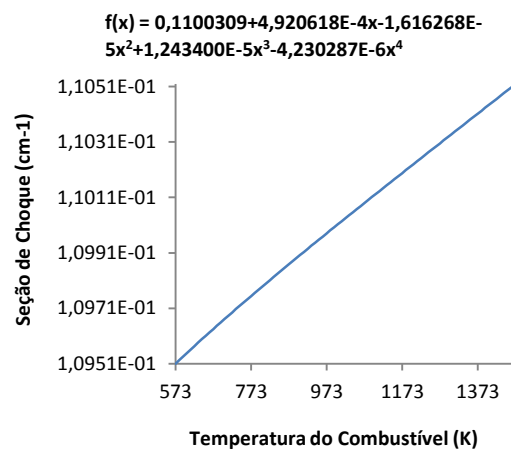


FIG. 11.315 Seção de choque de absorção térmica.

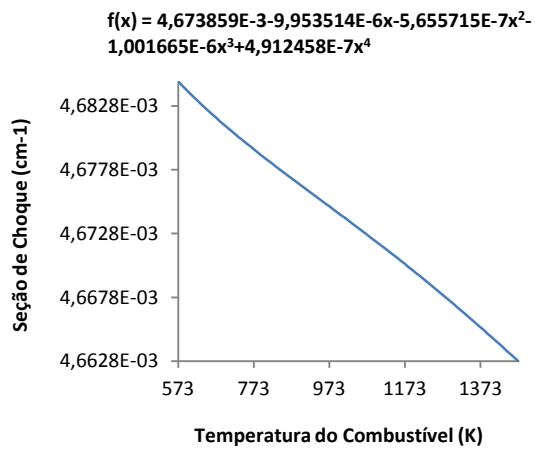


FIG. 11.316 Seção de choque de nu-fissão rápido.

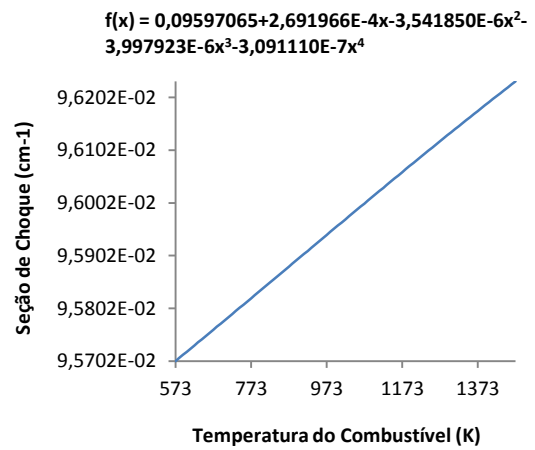


FIG. 11.317 Seção de choque de nu-fissão térmico.

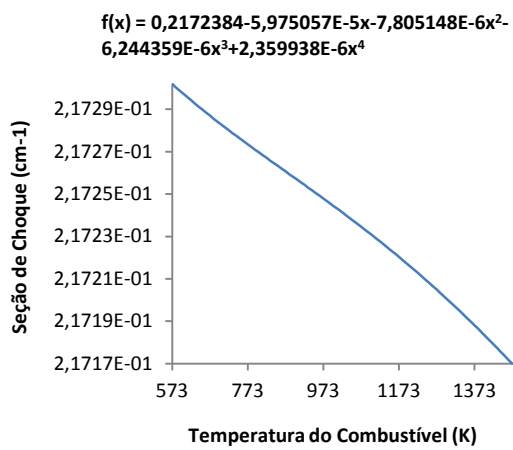


FIG. 11.318 Seção de choque de transporte rápido.

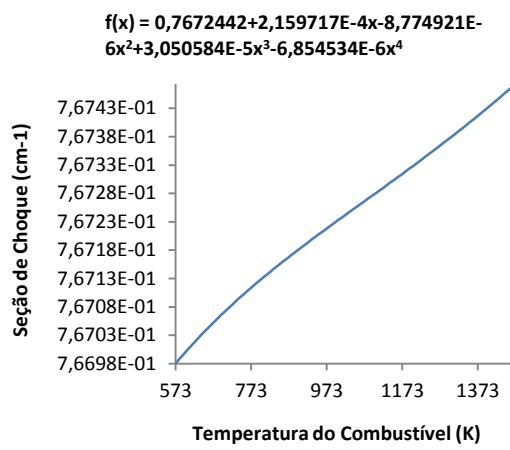


FIG. 11.319 Seção de choque de transporte térmico.

11.4.4.2 PARAMETRIZAÇÃO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA E DENSIDADE DO MODERADOR

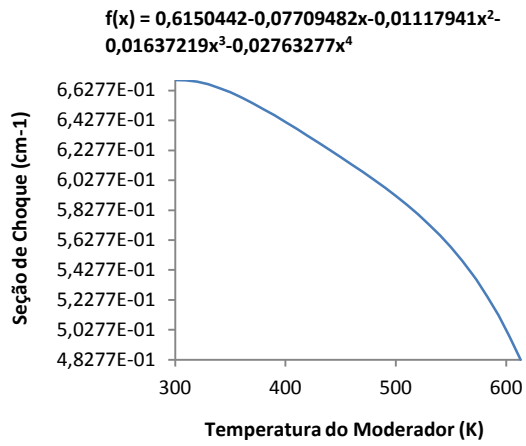


FIG. 11.320 Seção de choque total rápido.

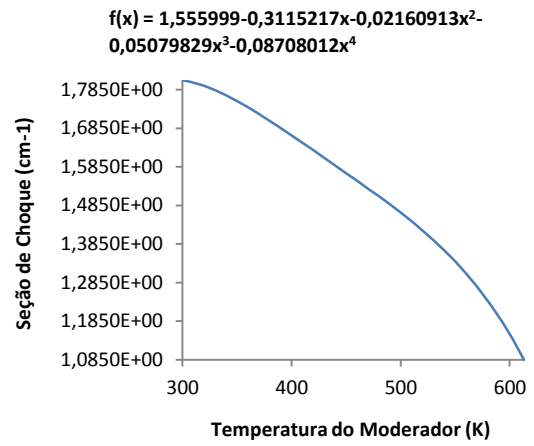


FIG. 11.321 Seção de choque total térmico.

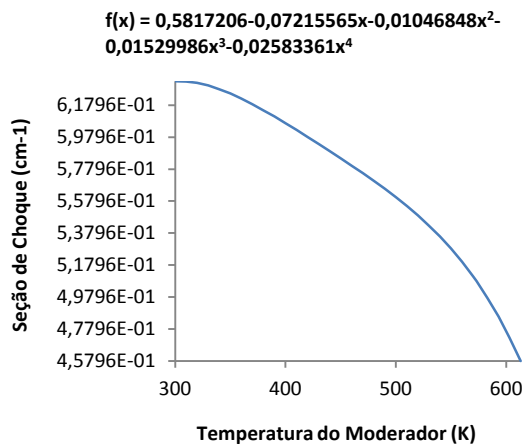


FIG. 11.322 Seção de choque de espalhamento 1-1.

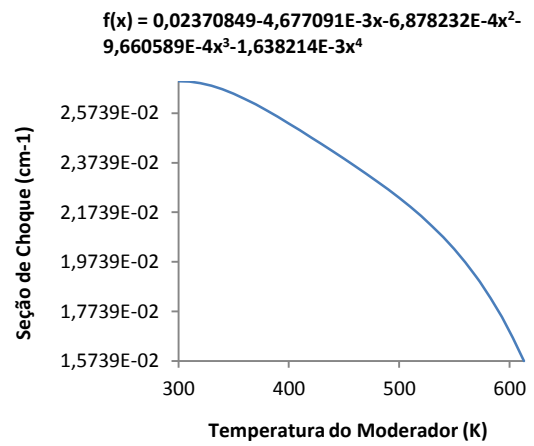


FIG. 11.323 Seção de choque de espalhamento 1-2.

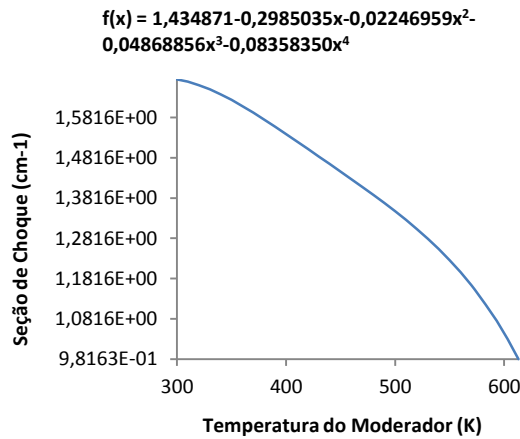


FIG. 11.324 Seção de choque de espalhamento 2-2.

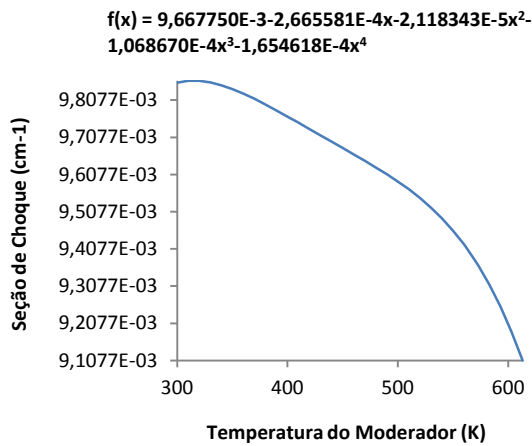


FIG. 11.325 Seção de choque de absorção rápida.

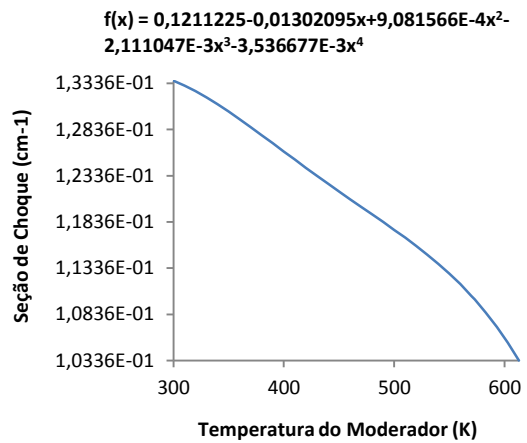


FIG. 11.326 Seção de choque de absorção térmica.

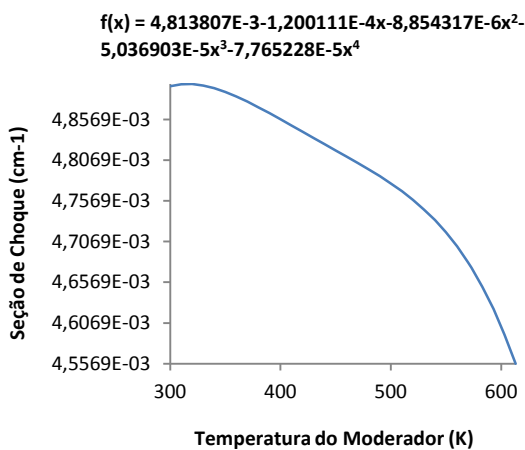


FIG. 11.327 Seção de choque de nu-fissão rápido.

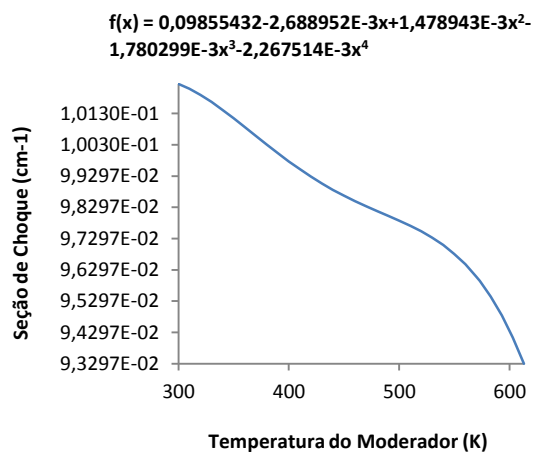


FIG. 11.328 Seção de choque de nu-fissão térmico.

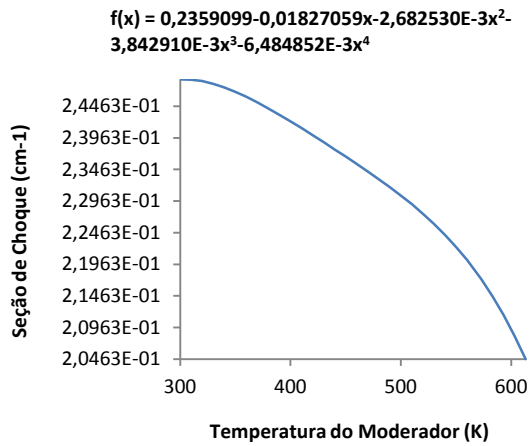


FIG. 11.329 Seção de choque de transporte rápido.

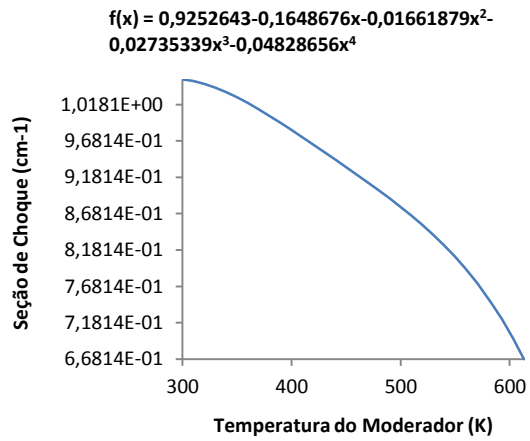


FIG. 11.330 Seção de choque de transporte térmico.

11.4.4.3 PARAMETRIZAÇÃO EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE BORO SOLÚVEL

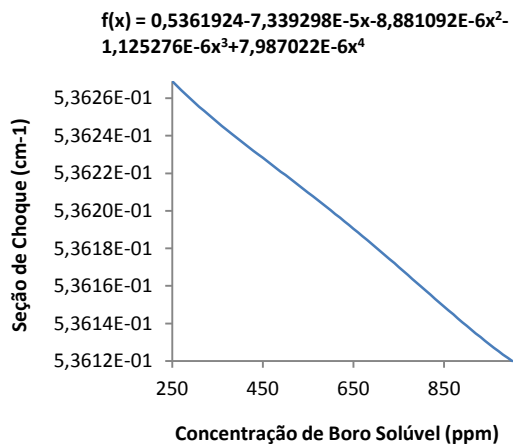


FIG. 11.331 Seção de choque total rápido.

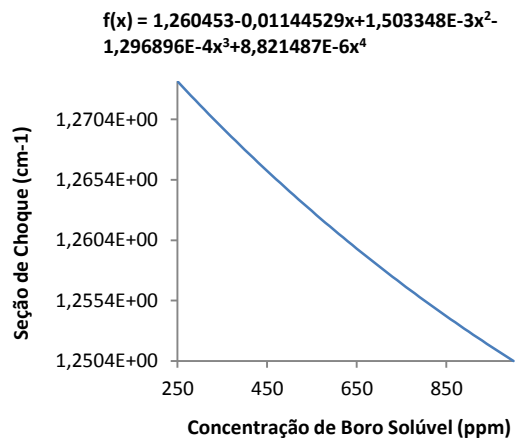


FIG. 11.332 Seção de choque total térmico.

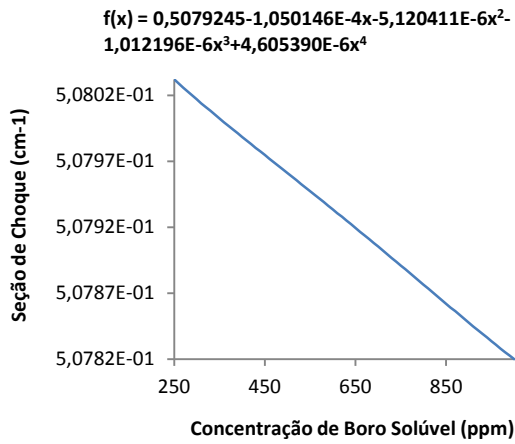


FIG. 11.333 Seção de choque de espalhamento 1-1.

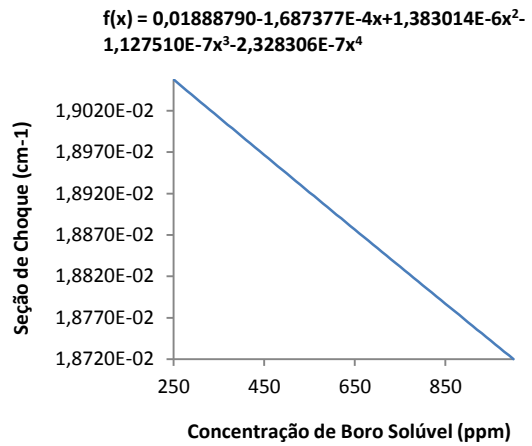


FIG. 11.334 Seção de choque de espalhamento 1-2.

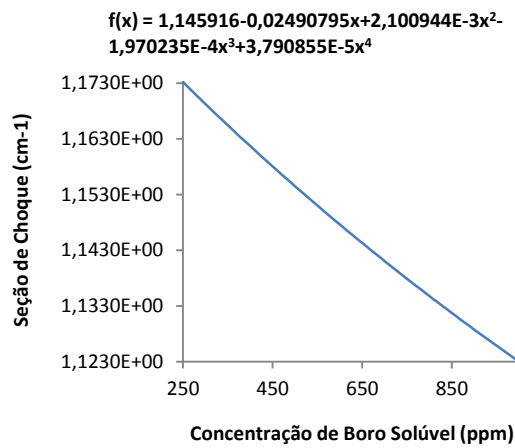


FIG. 11.335 Seção de choque de espalhamento 2-2.

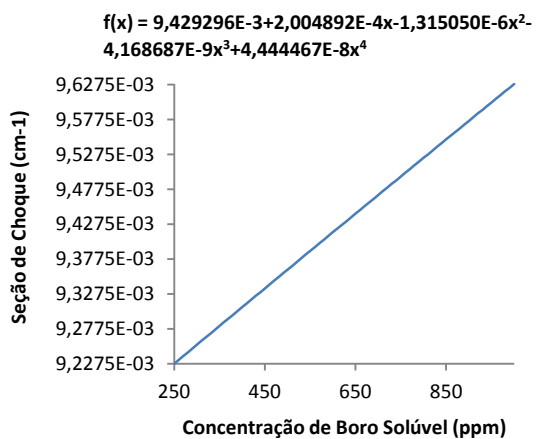


FIG. 11.336 Seção de choque de absorção rápida.

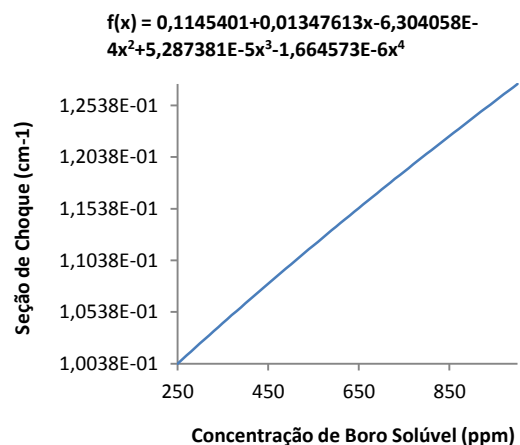


FIG. 11.337 Seção de choque de absorção térmica.

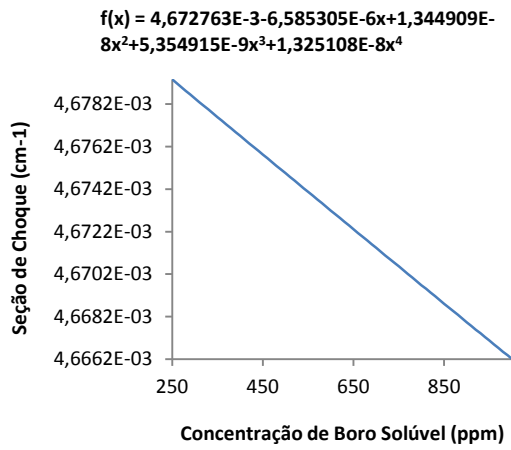


FIG. 11.338 Seção de choque de nu-fissão rápido.

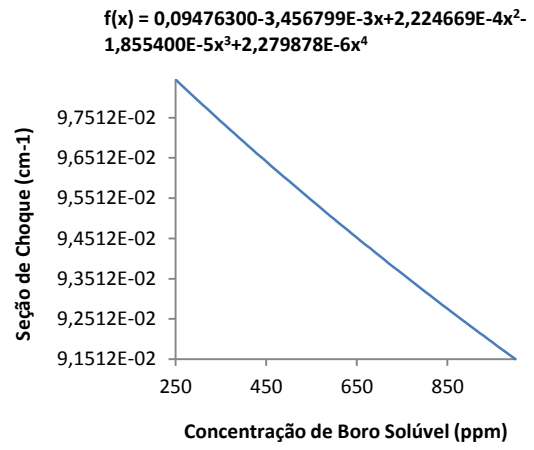


FIG. 11.339 Seção de choque de nu-fissão térmico.

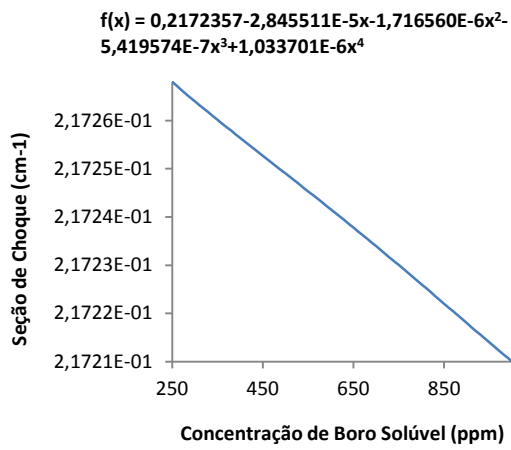


FIG. 11.340 Seção de choque de transporte rápido.

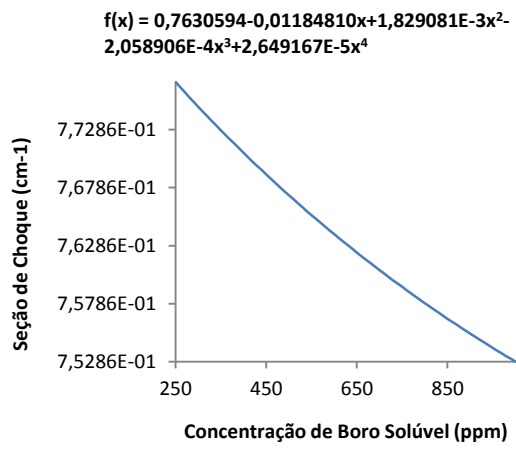


FIG. 11.341 Seção de choque de transporte térmico.

11.4.4.4 PARAMETRIZAÇÃO EM FUNÇÃO DO ENRIQUECIMENTO DE $^{235}_{92}\text{U}$

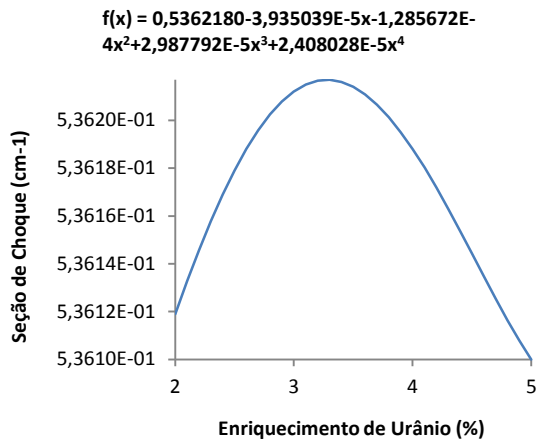


FIG. 11.342 Seção de choque total rápido.

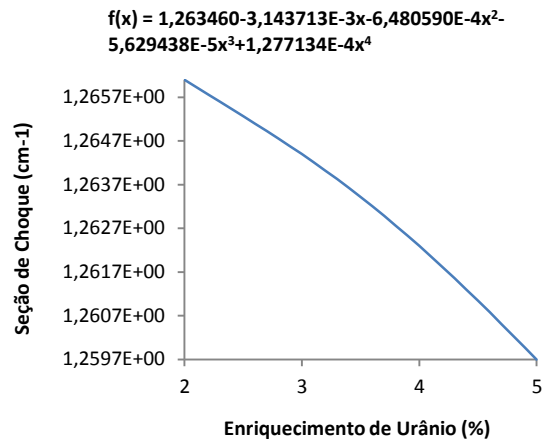


FIG. 11.343 Seção de choque total térmico.

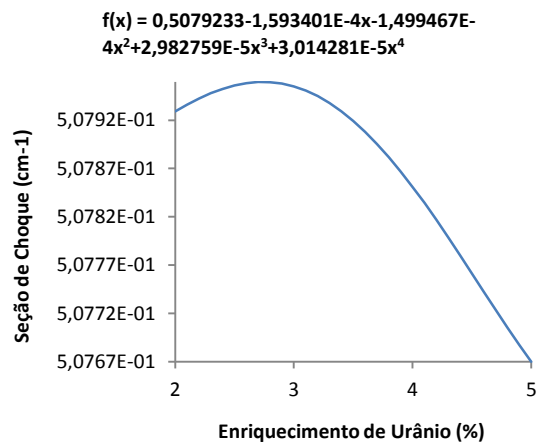


FIG. 11.344 Seção de choque de espalhamento 1-1.

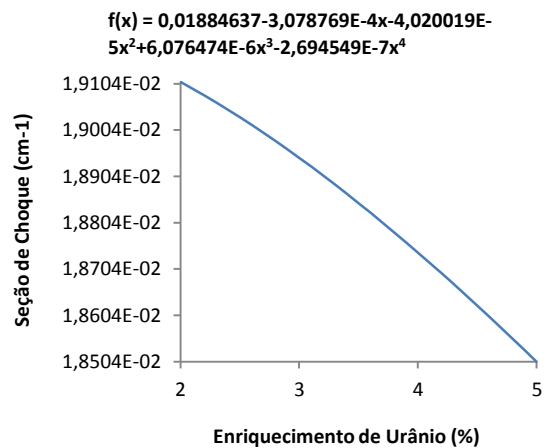


FIG. 11.345 Seção de choque de espalhamento 1-2.

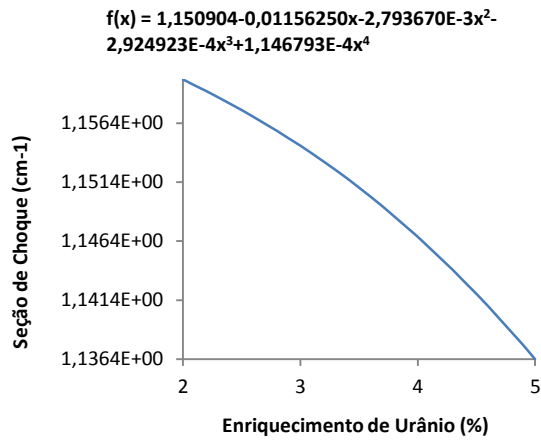


FIG. 11.346 Seção de choque de espalhamento 2-2.

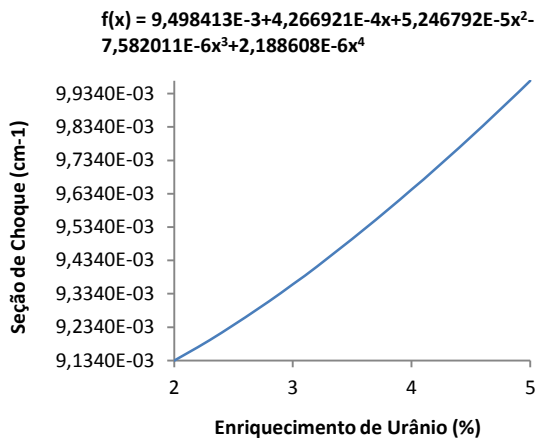


FIG. 11.347 Seção de choque de absorção rápida.

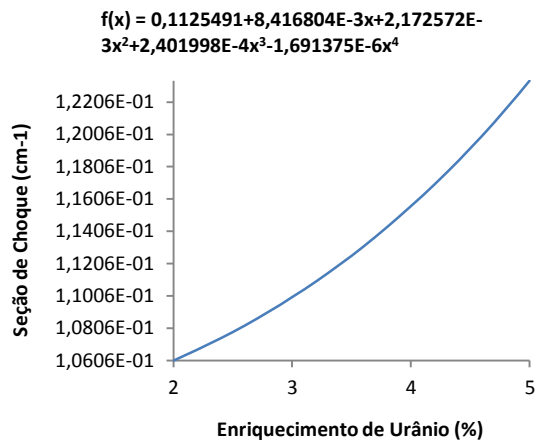


FIG. 11.348 Seção de choque de absorção térmica.

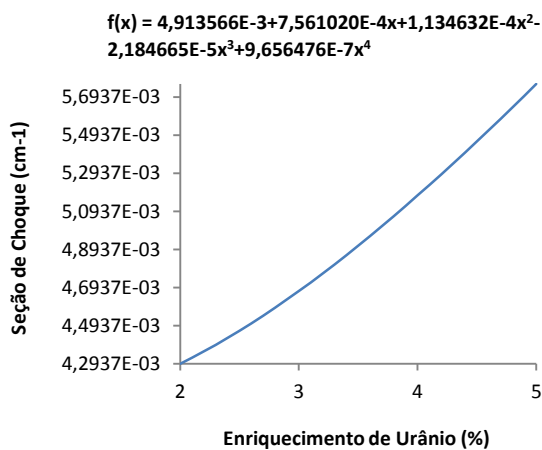


FIG. 11.349 Seção de choque de nu-fissão rápido.

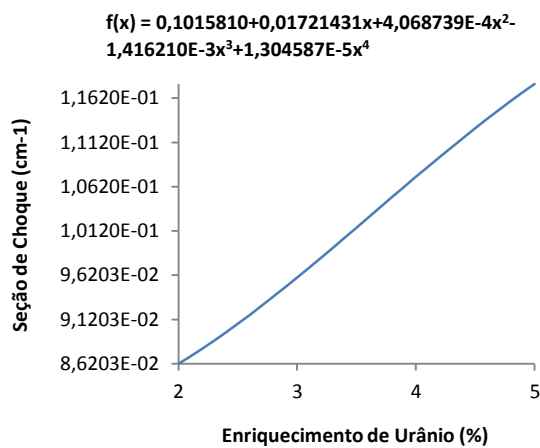


FIG. 11.350 Seção de choque de nu-fissão térmico.

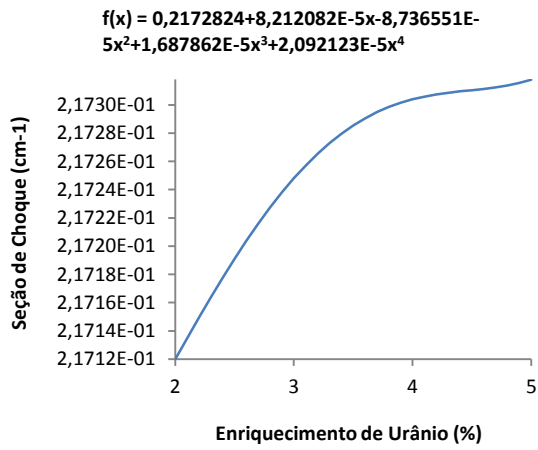


FIG. 11.351 Seção de choque de transporte rápido.

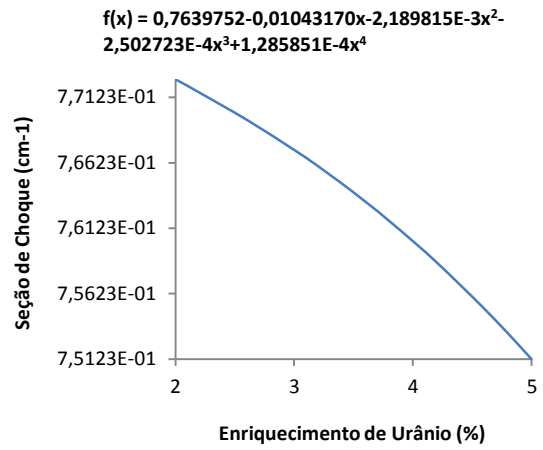


FIG. 11.352 Seção de choque de transporte térmico.