

CÁLCULOS CELULARES UTILIZADOS NO IPEN-CNEN

por

ADIMIR DOS SANTOS

RESUMO -- Neste trabalho descreve-se as características principais do programa HAMMER-TECHNION. Inicialmente é feita uma descrição da metodologia de cálculo aplicável tanto à região térmica bem como às regiões epitérmica e rápida de energia do nêutron. As equações principais aplicáveis a essas regiões de energia serão apresentadas e brevemente descritas e finalizando serão apresentados e descritos os dados de entrada para o cálculo das seções de choque em 4 grupos de um elemento típico MTR. Os resultados serão aplicados num cálculo subsequente com o programa CITATION.

INTRODUÇÃO

A primeira etapa no projeto nuclear de um reator nuclear é a preparação de seções de choque em poucos grupos para subsequente utilização em códigos que utilizam a teoria da difusão. Dentre os programas que são especialmente projetados para preparar seções de choque em poucos grupos citam-se: LEOPARD /1/, HAMMER /2/, HAMMER-TECHNION /3/ e WIMS /4/. Esses códigos muito embora sejam utilizados para o mesmo objetivo, possuem diferenças sensíveis em metodologia de cálculo e biblioteca básica de dados nucleares.

Os programas de preparação de seções de choque em poucos grupos mais utilizados no IPEN/CNEN/SP são os códigos HAMMER e sua versão mais elaborada do ponto de vista de metodologia de cálculo, HAMMER-TECHNION. A versão HAMMER-TECHNION foi preparada no Departamento de Engenharia Nuclear do "Israel Institute of Technology" e possui mudanças sensíveis em relação a versão original no tratamento da autoblindagem dos nuclídeos actinídeos (U-235, U-238 etc). O propósito aqui será mostrar algumas características principais do programa HAMMER-TECHNION e executar alguns problemas simples de interesse para núcleos de pesquisa.

O programa HAMMER-TECHNION basicamente segue o mesmo procedimento de seu antecessor. A região térmica de energia do nêutron ($\sim 10^{-5}$ eV - 0.625eV) é tratada pelo procedimento do programa THERMOS /5/. A equação integral de transporte para a densidade total de neutrons é resolvida na célula unitária em 30 grupos de velocidades.

A região de energia do nêutron acima do cutoff térmico é tratada pela solução numérica da equação integral de transporte na célula unitária. Nos grupos onde existem ressonâncias dos nuclídeos que compõem a célula unitária, o cálculo de autoblindagem dessas ressonâncias é realizado concomitantemente com a solução da equação integral de transporte, 54 grupos de energia são utilizados na região de energia do nêutron acima do cutoff térmico. O espectro final de neutrons na célula homogeneizada é obtido através de uma transformada de Fourier para a fuga, para todos os grupos de energia.

As mudanças mais sensíveis do programa HAMMER-TECHNION em relação a versão original residem nos métodos de tratamento da autoblindagem das ressonâncias dos núclídeos actinídeos. Uma das mudanças mais marcantes é a opção de utilizar o procedimento do programa RABBLE /6/ com seções de choque pontuais ao invés do procedimento tradicional baseado no método de Nordheim /7/. Nos capítulos subsequentes será ilustrada uma descrição resumida do tratamento efetuado pelo programa HAMMER-TECHNION nas regiões de energias dos neutrons, térmica e rápida.

TRATAMENTO NA REGIÃO TÉRMICA:
O PROGRAMA THERMOS

O tratamento do espectro de neutrons na região térmica é efetuado utilizando o procedimento do programa THERMOS. THERMOS resolve a equação integral de transporte de neutrons para a densidade total de neutrons em grupos de velocidades assumindo grau de anisotropia de espalhamento de, no máximo, 1ª ordem. Esquemáticamente a equação resolvida nas várias subregiões da célula unitária pelo programa HAMMER-TECHNION pode ser escrita como:

$$N_{ni} = \sum_k T_{nki} Q_{ki}, \quad (1)$$

onde:

N_{ni} - Densidade total de neutrons por unidade de velocidade na subregião n e grupo i,

$$Q_{ki} = \frac{1}{v_i} \left(\sum_j P_{kij}^0 N_{kj} + S_{ki} \right),$$

S_{ki} - Fonte de neutrons no grupo i e na subregião k devido à moderação de neutrons acima da região térmica.

$P_{kij}^0 N_{kj}$ - Fonte de neutrons no grupo i e na subregião k devido ao espalhamento de neutrons no grupo j para o momento de Legendre de ordem zero.

T_{nki} - Matriz de transporte cujos elementos são dados por :

$$T_{nki} = \frac{1}{v_n} \int_{\Delta V_n} d\vec{r} \int_{\Delta V_k} d\vec{r}' \frac{e^{-(\Sigma s)_i}}{4\pi s^2},$$

$$s = |\vec{r} - \vec{r}'|,$$

$\Delta V_n, \Delta V_k$ - volume das subregiões n e k,

Σ - seção de choque macroscópica total e

v_n - velocidade do grupo n.

A Equação (1) é resolvida no programa HAMMER-TECHNION para cada grupo de velocidade e em cada subregião da célula unitária. Os elementos diagonais da matriz P^0_{kij} são corrigidos pela aproximação de transporte. O mesmo tipo de procedimento é adotado para a seção de choque total. Dessa forma todos os dados nucleares necessários à solução da equação integral de transporte na célula unitária possuem consistência interna.

Uma inovação em relação ao sistema original HAMMER é a utilização do método de Carlvik /3/ para o cálculo dos elementos da matriz de transporte. Esse método é utilizado somente em geometria cilíndrica e tem provado ser mais preciso do que o método da versão original.

Uma vez convergida a solução da equação integral de transporte, procede-se o cálculo de homogeneização e o subsequente colapsamento das seções de choque em poucos grupos. Para esse propósito, o programa HAMMER-TECHNION faz uso de uma transformada de Fourier para a fuga e utiliza como função ponderação, o espectro de neutrons obtido por meio desse procedimento. O colapsamento pode ser efetuado em vários grupos amplos ou se o usuário preferir o colapsamento é efetuado num único grupo amplo cobrindo os grupos 1 a 29 ($\sim 10^{-5} \text{eV} - 0.625 \text{eV}$). O colapsamento num único grupo amplo é o procedimento mais frequentemente utilizado em cálculos de parâmetros nucleares em Física de Reatores.

TRATAMENTO NAS REGIÕES RÁPIDA E EPITÉRMICA

O tratamento do espectro de neutrons nas regiões rápida e epitérmica do programa HAMMER-TECHNION segue as seguintes etapas:

- a) Solução da equação integral de transporte de neutrons na célula unitária.

Ao contrário do caso da região térmica, a equação integral de transporte de neutrons nas regiões rápida e epitérmica é resolvida para o fluxo escalar de neutrons ao invés da densidade total de neutrons como no caso do programa THERMOS. A equação integral de transporte de neutrons para o fluxo escalar na célula unitária pode ser escrita simbolicamente como :

$$\phi(\underline{r}) = \int \frac{d\underline{r}'}{4\pi\lambda^2} e^{-\Sigma\lambda} Q(\underline{r}'), \quad \lambda = |\underline{r}-\underline{r}'|.$$

Essa forma de equação integral é válida quando a fonte $Q(\underline{r}')$ do grupo em consideração é isotrópica; um ponto que deve ser levado em consideração na definição da seção de choque Σ utilizada na equação acima. A fonte $Q(\underline{r}')$ contém a contribuição dos neutrons que são produzidos por fissão no grupo em consideração e pelo "down scattering" dos neutrons em grupos que se situam energeticamente acima do grupo em consideração. Por uma questão de consistência o espalhamento "in-group" também é incluído na fonte $Q(\underline{r}')$.

Como um dos requisitos para a solução da equação integral de transporte de neutrons na região rápida é a distribuição espacial na célula unitária dos neutrons de fissão, essa distribuição é calculada na execução da parte térmica (THERMOS) do programa HAMMER-TECHNION. Dessa forma, a parte térmica do programa HAMMER-TECHNION precede a execução na região rápida.

b) Solução Concomitante da Equação Integral de Transporte e Cálculo da Autoblindagem das Ressonâncias dos Nuclídeos Actinídeos.

O procedimento exposto no ítem anterior é aplicável nos grupos de energia onde os nuclídeos actinídeos não apresentam ressonâncias. Na região de ressonância resolvida ($E < 5.53\text{KeV}$) o fluxo escalar de neutrons apresenta "dips" severos devido a autoblindagem das ressonâncias dos nuclídeos actinídeos ($u-235$, $u-238$ etc). É nessa região de energia do nêutron que os métodos de cálculo de seções de choque efetivas são mais elaborados e exigem tempos de computação na maioria dos casos sensíveis. Nos exemplos ilustrados, foi utilizado o método de Nordheim /7/ devido a sua simplicidade, rapidez de execução e por ter apresentado em muitos casos soluções satisfatórias quando comparadas com métodos de cálculo mais aprimorados.

A solução concomitante da equação integral de transporte e o cálculo da autoblindagem das ressonâncias dos nuclídeos actinídeos são necessárias devido ao fato que as seções de choque efetivas dependem do fluxo escalar de neutrons obtido através da solução da equação integral de transporte, o qual, por sua vez, depende das seções de choque efetivas. No programa HAMMER-TECHNION esse acoplamento é realizado em duas etapas distintas. O programa HAMMER-TECHNION trabalha com frações de absorções nas ressonâncias para levar em consideração o efeito da autoblindagem das ressonâncias dos nuclídeos actinídeos. Na primeira etapa, essas frações de absorções nas ressonâncias são colocadas iguais a zero tal que a distribuição do fluxo escalar na célula unitária, é obtida na ausência de ressonâncias. Esse fluxo é utilizado na segunda etapa no tratamento da autoblindagem das ressonâncias com o método de Nordheim para definir a fração de absorção nas ressonâncias. Após o cálculo das frações de absorções nas ressonâncias, a distribuição espacial do fluxo escalar é recalculada fazendo uso dessas frações de absorções. O fluxo escalar nas várias subregiões da célula unitária é agora reduzido devido à absorção nas ressonâncias e, portanto, o efeito da auto-blindagem nas ressonâncias fica plenamente levado em consideração. Na segunda iteração as frações de absorções nas ressonâncias não são recalculadas, desde que seus valores têm que ser baseados no fluxo escalar sem autoblindagem.

Esse procedimento é repetido para todos os grupos nos quais existam nuclídeos com ressonâncias resolvidas.

Além do cálculo do efeito da autoblindagem das ressonâncias resolvidas, o programa HAMMER-TECHNION também calcula a autoblindagem das ressonâncias não-resolvidas. O leitor interessado no método de autoblindagem das ressonâncias não-resolvidas deve dirigir-se a referência /3/ para uma descrição sucinta do algoritmo utilizado no HAMMER-TECHNION.

c) Cálculo das Seções de Choque em Poucos Grupos.

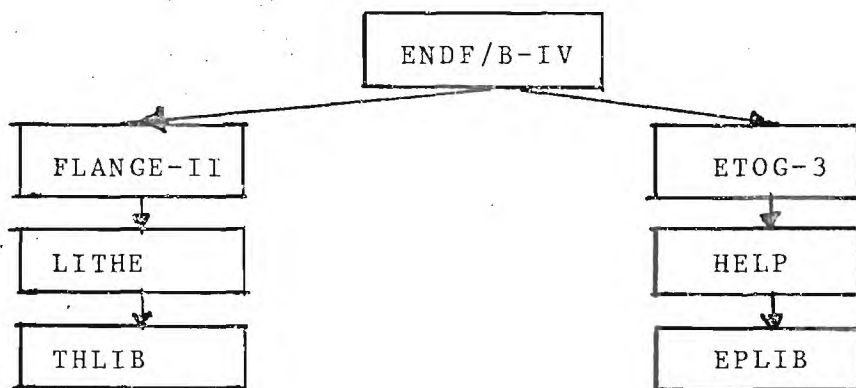
Após a solução da equação integral de transporte e o tratamento das ressonâncias resolvidas e não-resolvidas em cada grupo, as seções de choque e outros parâmetros relevantes são homogeneizados utilizando a distribuição espacial do fluxo de neutrons em cada grupo como função ponderação. Essa distribuição é a obtida na segunda iteração. Dessa forma os efeitos das absorções nas ressonâncias, implícitos nos fatores de heterogeneidade inerentes à célula unitária, estão plenamente levados em consideração. Após a homogeneização, todos os dados nucleares necessários para o cálculo das seções de choque em poucos grupos estão plenamente determinados.

O cálculo das seções de choque em poucos grupos é realizado utilizando como função ponderação o espectro obtido por meio de uma transformada de Fourier para a fuga num meio homogêneo. As equações finais resultantes constituem o procedimento do programa MUFT /8/. Duas particularidades inerentes ao procedimento do programa MUFT são as aproximações P_1 e B_1 . Nos cálculos realizados no IFEN/CNEN/SP a aproximação B_1 tem mostrado ser superior em qualidade de resultados em relação à aproximação P_1 .

Uma vez obtido o espectro de neutrons através do procedimento do programa MUFT procede-se o colapsamento em poucos grupos.

AS BIBLIOTECAS DE DADOS NUCLEARES TÉRMICA E EPITÉRMICA

As bibliotecas de dados nucleares necessárias para a execução do programa HAMMER-TECHNION são elaboradas e armazenadas em dois caminhos distintos. O esquema de geração dos dados nucleares é ilustrado no diagrama abaixo:



O processamento dos dados nucleares começa com o arquivo de dados nucleares ENDF/B-IV. A parte referente a elaboração da biblioteca térmica (THLIB) é realizada com os programas FLANGE-II /9/ e LITHE /3/. O programa FLANGE-II prepara seções de choque em 30 grupos de energia com os dados nucleares do arquivo ENDF/B-IV e a partir de uma função de ponderação escolhida entre as disponíveis no programa. A escolha mais comum é uma distribuição maxwelliana na temperatura da aplicação. Para materiais que

possuem leis de espalhamento $S(\alpha, \beta)$ como o hidrogênio ligado na água, o programa FLANGE-II calcula a matriz de espalhamento térmica necessária no cálculo do espectro térmico, realizado pela parte térmica (THERMOS) do programa HAMMER-TECHNION. O programa LITHE prepara as seções de choque e a matriz de espalhamento calculadas pelo programa FLANGE-II num formato compatível com a biblioteca térmica do HAMMER-TECHNION. Para materiais que não possuem leis de espalhamento $S(\alpha, \beta)$, o programa LITHE possui a opção de calcular a matriz de espalhamento com o módulo de gás livre /10/.

A parte referente a elaboração da biblioteca epitérmica (EPLIB) é realizada com os programas ETOG-3 /11/ e HELP /3/. O programa ETOG-3 prepara seções de choque, matriz de espalhamento inelástica e parâmetros necessários ao procedimento do programa MUFT ($\sigma_s, \bar{u}\sigma_s$, etc), em 54 grupos de energia. Além disso, para os materiais que possuem ressonâncias, o programa ETOG-3 também prepara os parâmetros necessários (T_n, T_Y , etc) para o cálculo da autoblindagem nas ressonâncias. Essa última parte é efetuada para cada grupo onde ocorrem as ressonâncias. A preparação de todos esses dados nucleares num formato compatível com a biblioteca epitérmica do HAMMER-TECHNION é realizada com o programa HELP.

APLICAÇÃO PRÁTICA DO PROGRAMA HAMMER-TECHNION

Considere um elemento combustível tipo MTR com as seguintes especificações:

Enriquecimento	19.9% em peso de U-235
Massa no cerne de: U-235	: 10g/placa; 180g/EC
U_3O_8	: 59,3 g/placa; 1067,4 g/EC
Urânio	: 50,25 g/placa; 904.5 g/EC
Alumínio	: 45,5 g/placa

Número de placas/EC	: 18
Fração em peso de Urânio/Placa	: 47,95%
Fração em peso de Urânio/ U_3O_8	: 56.6%

Dados Geométricos da Placa de Combustível :

Espessura do Cerne :	0.076cm
Espessura do Revestimento:	0.038cm
Espaçamento centro-a-centro das placas:	0.441cm
Espaçamento do Canal:	0.289cm

Temperaturas de Operação:

Temperatura do moderador :	32°C
Temperatura do revestimento:	41°C
Temperatura do cerne:	42°C

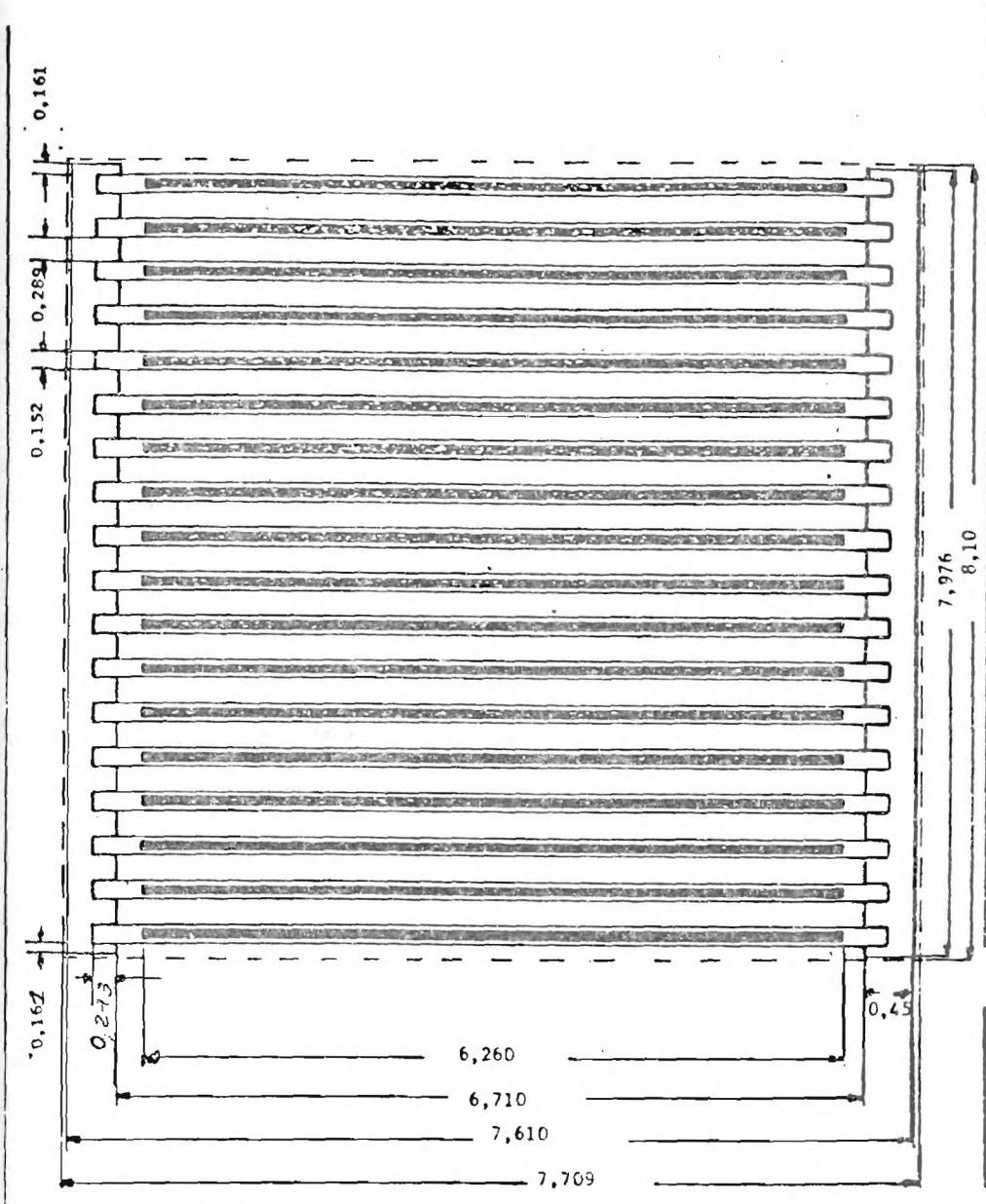
Dados Geométricos do Elemento Combustível.

Espaçamento centro-a-centro dos
Elementos Combustíveis : 8,1 cm (em x)
7.709 cm (em y)

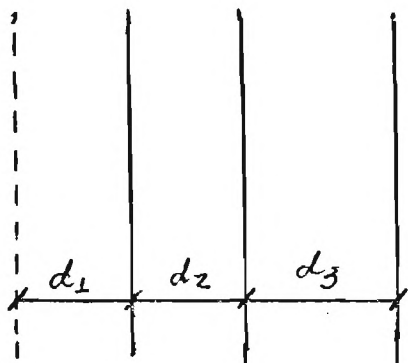
Espessura da Placa Suporte de Al: 0,456 cm
Largura da Placa Suporte de Al : 7,976 cm

Comprimento da Placa Suporte de Al : 7.610 cm
Altura Ativa do Núcleo : 60,0 cm

Ilustração Geométrica do Elemento Combustível :



O propósito aqui é calcular seções de choque macroscópicas em 4 grupos de energia para utilização posterior num cálculo com o programa CITATION /12/. A célula unitária aplicável à região combustível é constituída de um arranjo infinito repetitivo ilustrado no esquema abaixo:



$$d_1 = 0.038 \text{ cm (1/2 espessura do cerne)}$$

$$d_2 = 0.038 \text{ cm Revestimento}$$

$$d_3 = 0.1445 \text{ cm (1/2 espessura do moderador)}$$

Os cálculos das concentrações atômicas (átomos/barn-cm) dos núclídeos que constituem a célula unitária do combustível, como também das demais regiões (regiões extras), estão descritos no Appendice A. Procede-se aqui apenas a discussão dos aspectos relevantes dos dados de entrada para a execução do programa HAMMER-TECHNION. A descrição dos dados de entrada para a execução do programa HAMMER-TECHNION encontra-se no Appendice B.

A entrada de dados necessária para a execução do programa HAMMER-TECHNION na célula unitária aplicável à região combustível é mostrada na página seguinte.

	10	20	111			
0 0 0	1 1 01	CELULA DE COMPOSITIVOI TRAP1-T P P-N/CNEN-SP				
1	1	UBO ^o -AI(19.9%U-235)-CUESO A I R A				
2 1 3	3 1 0	97.85				
3 1 1	12 40	0.0149606			42.0	
4		92235.	0.			8.97615-04
5		92238.	0.			3.56727-03
6		8016.	1030.			1.19106-02
7		13027.	1030.			3.55782-02
8		92236.	0.			1.00000-20
9		94239.	0.			1.00000-20
10		94240.	0.			1.00000-20
11		94241.	0.			1.00000-20
12		94242.	0.			1.00000-20
13		54135.	0.			1.00000-20
14		62149.	0.			1.00000-20
15		3.	0.			1.00000-20
16 2 2	1 10	0.0149606			41.0	
17		13027.	1030.			6.02664-02
18 3 3	2 51	0.0568898			32.0	
19		8016.	1030.			3.32902-02
20		1001.	1030.			6.65803-02
		25	10	25		

92238. 92235.

- 171 1
- 172 2
- 173 3
- 174 1 2 3

- OPENUP
- 16 0 03 4
 - 1 1001.
 - 2 1001.
 - 3 1001.
 - 3 17.87
 - 2 20
 - 0 0.0 1

O exemplo descrito ilustra os dados de entrada para o programa HAMMER-TECHNION numa forma bem generalizada. Nesse caso, serão executados tanto os cálculos referentes ao espectro térmico (THERMOS RUN) como também os referentes às regiões de energia de nêutron epitérmica e rápida (HAMLET RUN). Observe o dígito 1 na coluna 14 e o dígito 2 na coluna 25 da primeira entrada de dados, respectivamente, requisitando a execução dos programas THERMOS e HAMLET. A opção "SHORT PRINT" será executada em ambos os casos. Ainda na primeira entrada de dados solicita-se que o espectro obtido com o "buckling" crítico seja utilizado como função ponderação no colapsamento das seções de choque em poucos grupos. Mais além, solicita-se o tratamento da aproximação plena P_1 para a moderação dos nêutrons no Hidrogênio e o tratamento de segunda ordem para a moderação nos demais nuclídeos. Essas opções são requisitadas com o dígito 1 nas colunas 27, 28 e 29, respectivamente.

Foi efetuada uma modificação no programa HAMMER-TECHNION e implementada no IPEN-CNEN. Esta modificação permite o cálculo de queima para tal, foi inserida internamente a esse programa uma rotina para calcular a queima do U-235 e produção de Xe-135, Sm-149, U-234, U-236 e dos isótopos do Plutônio. Essa opção é requisitada colocando-se o dígito 2 na primeira coluna da primeira entrada de dados. Os dados adicionais necessários ao cálculo de queima são inseridas após o cartão BURNUP. A descrição desses dados será deixada para o final dessa discussão.

A segunda e a terceira entrada de dados são apenas cartões de controle e não adicionam nada que possa ser considerado relevante ao exercício proposto nesse curso. Na quarta entrada de dados são especificados a geometria, o número de regiões e misturas, a aproximação B_1 e o Buckling (em m^{-2}). Observe que o cálculo da célula unitária aplicável a região combustível é efetuado em geometria plana (slab) com três regiões e três misturas (cerne, cladding e moderador). A aproximação B_1 é utilizada para o cálculo do espectro de nêutrons por meio da transformação de Fourier para a fuga.

Na quinta entrada de dados são especificadas o número da região e a mistura correspondente, o número de nuclídeos que compõem essa região, o número de meshes aplicável à essa região, se o "upscattering" é levado em consideração ou não, a espessura da região (em polegadas) e finalmente a temperatura da região. Observe que esse tipo de cartão é aplicável nas três regiões que compõem a célula unitária do combustível. Mais além, note que a região combustível (cerne, região 1) é composta de 12 nuclídeos; 4 meshes são utilizados nessa região e não está sendo levado em consideração o "upscattering" por tratar-se de uma região composta principalmente por nuclídeos pesados. A única região na qual é levada em consideração o "upscattering" é o moderador (região 3). A seguir são fornecidas as identificações (WSTBA) dos vários nuclídeos que constituem as três regiões da célula unitária bem como as concentrações em átomos/barn-cm. No programa HAMMER-TECHNION, a identificação dos nuclídeos segue a convenção 1000Z+A; onde Z é o número atômico e A é o número de massa do nuclídeo. A variável WSTBB (Thermal temperatura/model) também é especificada no mesmo conjunto de dados. Essa variável especifica a temperatura na qual o núcleo de espalhamento térmico foi calculado. Como é de se esperar, o núcleo de espalhamento térmico é especificado somente para

nuclídeos leves. $WS_{TBB}=0$ significa que não existe núcleo de espalhamento térmico para o nuclídeo em questão. $WST_{BB}=1030$ significa que o núcleo de espalhamento térmico foi calculado na temperatura de 300°K. Os núcleos de espalhamento térmicos são calculados na elaboração da biblioteca de dados nucleares pelos programas Flange-II e LITHE.

A especificação dos nuclídeos que constituem as várias misturas da célula unitária é encerrada especificando a variável 'LCT' igual a 1. Note que a variável LCT é especificada igual a 1 na última entrada de dados referente à mistura 3. Mais precisamente, o cartão especificando a concentração do Hidrogênio. Com esse conjunto de dados, a especificação das misturas nas várias regiões da célula unitária fica encerrada. Os dados a seguir são especificações de como o colapsamento na célula unitária é estruturado.

Após a última entrada de dados especificando as misturas nas várias regiões, são especificadas as energias de corte onde as seções de choque serão colapsadas. O colapsamento das seções de choque no programa HAMMER-TECHNION é efetuado em duas etapas distintas. A primeira etapa refere-se ao cálculo efetuado na região térmica (THERMOS RUN). Nesse caso as seções de choque podem ser colapsadas em vários grupos ou num único grupo cobrindo o intervalo de energia do nêutron compreendido entre 10^{-5} eV a 0.625eV. A variável Index 1 do primeiro cartão de dados especifica se o colapsamento efetuado na região térmica será efetuado num único grupo ou em vários grupos. No exemplo desse curso, o colapsamento será efetuado num único grupo cobrindo o intervalo de energia do nêutron compreendido entre 10^{-5} eV a 0.625eV. O colapsamento na segunda etapa refere-se ao colapsamento efetuado nas regiões rápida e epitérmica do nêutron. Nesse caso, o colapsamento é efetuado simultaneamente em dois e três grupos de energia. As variáveis N1, N2 e N3 especificam os cortes (Break Points) nos vários grupos onde o colapsamento é efetuado. No exemplo desse curso: N1=25, N2=10 e N3=25. Dessa forma o primeiro grupo amplo da estrutura em dois grupos epitérmicos compreende os grupos 1 a 25 enquanto que o segundo compreende os grupos 26 a 54. Na estrutura em três grupos, o primeiro grupo amplo compreende os grupos 1 a 10, o segundo 11 a 25 e o terceiro 26 a 54. Convém salientar que o número total de grupos utilizados pelo programa HAMMER-TECHNION nas regiões rápida e epitérmica totalizam 54. Com essa estrutura de colapsamento os quatro grupos nos quais as seções de choque serão colapsadas e utilizadas num cálculo posterior com o CITATION possuem a seguinte estrutura em termos de energia do nêutron:

grupo 1	10 MeV - 0.8208 MeV.
grupo 2	0.8208 MeV - 5.53 KeV
grupo 3	5.53 KeV - 0.625 eV
grupo 4	0.625 eV - 10^{-5} eV.

Além das seções de choque colapsadas nessa estrutura de grupo, o output efetuado pelo programa HAMMER-TECHNION também terá as seções de choque colapsadas em 2 grupos epitérmicos e 1 térmico conforme mencionado no texto. De importância fundamental nessa entrada de dados é a variável INO a qual especifica o método utilizado no cálculo da autoblindagem das ressonâncias resolvidas dos nuclídeos actinídeos. Nos exemplos desse curso somente

será utilizado o método de Nordheim. Dessa forma, a variável INO é especificado como zero.

A próxima entrada de dados refere-se à nuclídeos nos quais as razões entre taxas de reação são comumente calculadas. Exemplos típicos dessas taxas de reação são a razão entre as taxas de captura epitérmica e térmica no U-238 (σ_{28}), a razão entre as taxas de fissão epitérmica e térmica no U-235 (σ_{-25}) e a razão entre as taxas de fissão total no U-238 e as correspondentes no U-235 (σ_{-28}). Por essa razão são especificadas nessa entrada de dados os nuclídeos 92238 e 92235.

O próximo conjunto de dados refere-se ao colapsamento por região. Essa parte do output do programa HAMMER-TECHNION não faz parte da versão liberada pelo Departamento de Engenharia Nuclear do "Israel Institute of Technology" e foi elaborada e codificada na Universidade de Michigan. Dessa forma, os dados de entrada necessários para colapsar as seções de choque por região não faz parte dos dados de entrada normais desse programa. Os dados de entrada referente ao colapsamento por zona são fornecidos separadamente no Appendice B. No exemplo do curso, as seções de choque serão colapsadas por região de quatro maneiras distintas. O colapsamento será efetuado separadamente nas regiões do cerne, cladding, moderador e finalmente nas três regiões juntas. As seções de choque colapsadas no último tipo de colapsamento são iguais as seções de choque obtidas pelo procedimento normal do programa, uma vez que o colapsamento é efetuado na célula unitária interior.

Finalizando os dados de entrada para o programa HAMMER-TECHNION, especifica-se os dados necessários ao cálculo de queima. Essa parte do programa HAMMER-TECHNION foi elaborada e codificada internamente no IPEN/CNEN-SP. Além de fazer os cálculos de queima, as seções de choque microscópicas colapsadas em 2 ou 4 grupos são escritas num arquivo binário e num formato compatível com o programa CITATION. Os dados de entrada necessários ao cálculo de queima também são fornecidos no Appendice B. No exemplo do curso solicita-se que as seções de choque microscópicas sejam colapsadas em 4 grupos e que a matriz de transferência seja incluída no Hidrogênio. Três intervalos de queima são solicitados, sendo o primeiro de 2 dias e os demais de 20 dias. O combustível será irradiado numa densidade de potência média de 17.87. W/cm³.

Para o cálculo subsequente com o CITATION serão utilizados somente os dados relativos ao início de vida. Para esse propósito são apresentados na Tabela 5.1 os dados nucleares do combustível necessários ao cálculo com o programa CITATION.

TABELA 5.1 - SEÇÕES DE CHOQUE PARA O COMBUSTÍVEL

* SEÇÃO DE CHOQUE DE REMOÇÃO

Grupo	$\sqrt{\Sigma_f}$	Σ_a	Σ_R^*	D
1	1,19661E-3	8,66300E-4	7,91411E-2	2,06370E+00
2	6,25807E-4	5,37395E-4	9,56506E-2	1,14713E+00
3	9,93875E-3	1,23660E-2	8,78952E-2	7,84002E-01
4	1,44149E-1	8,43545E-2	0,0	2,49852E-01

Além das seções de choque do combustível, o cálculo a ser realizado com o programa CITATION requer ainda as seções de choque da região extra aplicável ao combustível, da região de controle e dos materiais refletores. Nesses casos o modelo aplicável a cada uma dessas regiões bem como as dimensões e composições estão descritas no Appendice A. Aqui serão apresentados somente os resultados finais para utilização no programa CITATION.

TABELA 5.2 - SEÇÕES DE CHOQUE DE REGIÃO EXTRA DO COMBUSTÍVEL

Grupo	Σ_a	Σ_R	D
1	3,03123E-4	4,51762E-2	2,23238E+00
2	1,27366E-5	4,07024E-2	1,31057E+00
3	6,85973E-4	3,55944E-2	1,47176E+00
4	1,30985E-2	0,0	4,97996E-01

TABELA 5.3 - SEÇÕES DE CHOQUE DE REGIÃO DE CONTROLE

Grupo	Σ_a	Σ_R	D
1	3,98308E-4	9,13309E-2	1,98599E+00
2	4,38523E-5	1,17601E-1	1,09247E+00
3	9,16651E-4	1,13498E-1	6,91177E-01
4	1,69436E-2	0,0	1,89609E-01

TABELA 5.4 - SEÇÕES DE CHOQUE PARA O REFLETOR DE GRAFITA

Grupo	Σ_a	Σ_r	D
1	1,01592E-04	2,35697E-02	2,13868E+00
2	3,03787E-05	1,03377E-02	1,13933E+00
3	1,04843E-04	5,97141E-03	1,01980E+00
<u>4</u>	2,07846E-03	0,0	8,56247E-01

TABELA 5.5 - SEÇÕES DE CHOQUE PARA O REFLETOR DE ÁGUA

Grupo	Σ_a	Σ_r	D
1	4,08349E-04	9,55456E-02	1,95086E+00
2	3,62462E-05	1,24112E-01	1,08738E+00
3	9,43221E-04	1,21742E-01	6,61299E-01
<u>4</u>	1,77872E-02	0,0	1,72760E-01

APÊNDICE A : DETERMINAÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES ATÔMICAS CELULARES

As concentrações atômicas celulares, relacionadas adiante, foram calculadas com a relação:

$$N_i = f_i \rho_i \frac{N_A}{A_i}$$

onde, N_i = concentração atômica (ou molecular) do isótopo (ou molécula) i em átomos/barn.cm;

f_i = fração volumétrica ocupada pelo i -ésimo isótopo na região considerada;

ρ_i = densidade de massa do isótopo i na mistura (g/cm^3)

A_i = massa atômica do i -ésimo isótopo

N_A = nº de Avogadro (já multiplicado pelo fator 10^{-24} , para que as concentrações atômicas sejam expressas em átomos/barn.cm). Nos cálculos em questão, utilizamos o valor $N_A = 0,602252$, dado no Lamarsh /A.1/.

No caso do combustível, em que o enriquecimento E do urânio em U-235 é expresso em porcentagem de massa, obtém-se a massa atômica média do urânio, $A_u(E)$, em função do enriquecimento pela expressão :

$$A_u(E) = \left[\frac{E}{A_{u-235}} + \frac{1-E}{A_{u-238}} \right]^{-1}$$

onde, A_{u-235} e A_{u-238} são as massas atômicas do U-235 e do U-238, respectivamente.

As massas atômicas utilizadas nos cálculos foram obtidos na Tabela de nuclídeos. A saber:

$$A_{u-235} = 235,0439$$

$$A_{u-238} = 238,0508$$

$$A_o = 15,9994$$

$$A_h = 1,00797$$

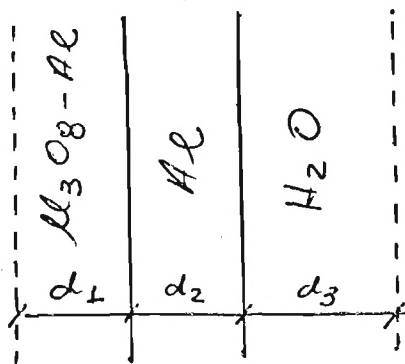
$$A_{Al} = 26,98154$$

$$A_c = 12,01115$$

Os dados de composição, geometria e massas de um elemento combustível MRT tipo placa, típico, foram relacionados na Seção 5.

Utilizando esses dados e as relações definidas acima, foram determinados as concentrações atômicas para as seguintes células :

a) Célula Combustível (U_3O_8-Al):



$d_1 = 0,038\text{cm}$ 1/2 espessura da região combustível da placa.

$d_2 = 0,038\text{cm}$ espessura do revestimento

$d_3 = 0,1445\text{cm}$ 1/2 espessura do moderador

Concentrações atômicas (átomos/barn.cm):

1) Combustível ($U_3O_8-Al-19,9\%$ em massa de U-235):

$$N_{u-235} = 8,976158-04$$

$$N_{u-238} = 3,567265-03$$

$$N_o = 1,191054-02$$

$$N_{Al} = 3,557818-02$$

2) Revestimento ($Al-\rho_{Al} = 2,7\text{g/cm}^3$):

$$N_{Al} = 6,026640-02$$

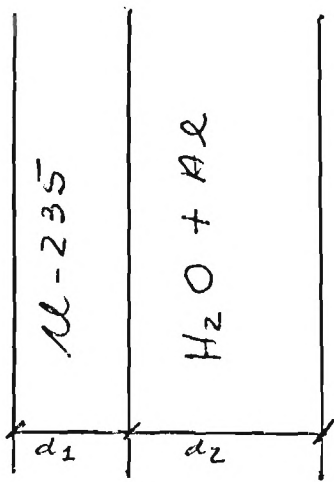
3) Moderador ($H_2O-T=32^\circ\text{C}; \rho_{H_2O}=0,995818\text{ g/cm}^3$):

$$N_o = 3,329015-02$$

$$N_H = 6,658030-02$$

b) Célula da Região Extra ($Al+H_2O$):

A região extra do combustível corresponde à homogeneização da placa suporte de Al mais a água que a envolve (Fig.5.1).



$d_1 = 0,0254\text{cm}$ 1/2 espessura (fina) de U-235 para fornecer o espectro neutrônico.

$d_2 = 0,362250\text{cm}$ 1/2 espessura da região extra

Concentrações Atômicas (átomos/barn.cm):

$$N_o = 9,437442-03$$

$$N_H = 1,887488-02$$

$$N_{Al} = 4,318145-02$$

c) Célula de $H_2O + A_1$ da Região de Controle:

Nos cálculos em questão, o elemento absorvedor de controle não foi considerado, sendo que as regiões em que estariam as placas de controle, foram considerados como preenchidas com água. A célula modelada, neste caso, é apresentada abaixo.

	0.0
$U_3O_8 - AL$	0.038 cm
AL	0.038 cm
H_2O	0.1445 cm
H_2O	0.1445 cm
AL	0.1520 cm.
H_2O	0.289 cm
H_2O	0.076 cm.

As concentrações atômicas são as mesmas já apresentadas anteriormente para a célula combustível.

d) Célula de Grafita + H_2O + Al

$$\rho_c = 1,60 \text{ g/cm}^3$$

A célula é semelhante a do ítem (b).

Concentrações Atômicas (átomos/barn.cm):

$$N_c = 6,569354-02$$

$$N_{Al} = 9,232020-03$$

$$N_o = 9,305988-04$$

$$N_H = 1,861198-03$$

e) Célula de H_2O + Al

Também é semelhante a do ítem (b)

Concentrações Atômicas (átomos/barn.cm).

$$N_{Al} = 9,232029-03$$

$$N_o = 2,819053-02$$

$$N_H = 5,638106-02$$

APPENDICE B

O propósito desse Appendice é apresentar a descrição e o formato dos dados de entrada para execução do programa HAMMER - TECHNION. Inicialmente são apresentados os dados de entrada normais para execução desse programa, observando que no primeiro dado de entrada existe a opção de cálculo de queima implementada no IPEN/CNEN-SP.

INPUT INSTRUCTIONS FOR HAMMER - TECHNIQ

<u>Column</u>	<u>Name</u>	<u>Description</u>
		<u>Card A</u>
		Batch control card with up to 2 optional additional cards
1	NCPRN	0 = end job 1 = normal run 2 = normal run with BURN-UP
2	NCPPPT	0 = short print for CAPN 1 = long print for CAPN
13	NTHRN	0 = no THERMOS run 1 = THERMOS run 2 = THERMOS run with Carlvik routine for cylindrical geometry
14	NTHPPT	0 = short print for THERMOS 1 = long print for THERMOS
15	NTHPN	0 = no punched edit 1 = punched edit for TWOTRAN
16	Index1	0 = standard edit for one broad thermal group (groups 1-29 of standard THERMOS group structure) 1 = non standard edit for more than one broad thermal group
17	Index2	0 = standard THERMOS edit (cut off at 0.625 eV) 1 = non standard THERMOS edit
18	Index3	0 = normal run 1 = no groupwise rebalancing in subroutine TIER
19	Index4	0 = standard (10^{-4}) THERMOS relative convergence 1 = improved convergence (10^{-5}) in subroutine TIER

<u>Column</u>	<u>Name</u>	<u>Description</u>
25	NEPRN	0 = no HAMLET run 2 = HAMLET run
26	NEPPT	0 = short print for HAMLET 1 = long print for HAMLET
27	NEPPN	0 = use flux spectrum at input buckling to calculate four broad group average σ 's for foil materials. 1 = use flux spectrum at critical buckling for broad group averaging
28	NEPSG	0 = Selengut-Coertzel approximation for Hydrogen 1 = full P_1 Hydrogen slowing down treatment
29	NEPAG	0 = standard age approximation for isotopes other than Hydrogen 1 = second order slowing down treatment for isotopes other than Hydrogen
30	ICADY	0 = upscattering correction for Hydrogen is not used in the low energy epithermal groups 1 = upscattering correction for Hydrogen is used
49	NEDRN	0 = no lattice library edit 2 = lattice library edit (LLT)
51	NEDPN	0 = exit from LLT to CAPN (LINK1) 1 = end run after LLT
		<u>Card A1</u> (Omit unless INDEX1=1)
1-6	NTHGP	Edit for NTHGP (max. 10) broad thermal groups. (NTHGP+1) THERMOS group boundaries are specified
7-12 : 67-72	IBNDRY (I)	Broad group I covers THERMOS groups IBNDRY (I) through IBNDRY (I+1)-1, except last group which ends at IBNDRY (NTHGP+1)

<u>Column</u>	<u>Name</u>	<u>Description</u>
		<u>Card A2</u> (Omit unless INDEX2=1)
1-6	IBNDRY(12)	Upper fine group for non standard THERMOS edit (29 if Index2=0)
7-18	EPCUT	Thermal cut-off energy: limit of wing corrections for Nordheim resonance integral calculations by ZUT code (see p. 7-26) (0.625 eV if Index2=0)
		<u>Card B</u> Batch lead card
6-7	NSTH	0 = normal run >0 = number of "THERMOS only" cases yet to be run in a "Restart Job" provided file INT1 has been kept, or number of "THERMOS and HAMLET" cases yet to be run in a "Restart Job" provided file INT2 has been kept Note: If NSTH>0 further input data is omitted
8-9	NSEP	0 = normal run >0 = number of "HAMLET only" cases yet to be run in a "Restart Job" provided file INT2 has been kept Note: If NSEP>0 further input data is omitted
10-14	IBSCH	Batch identification number
15-16	NCASE	Number of "THERMOS only", "HAMLET only", or "THERMOS and HAMLET" cases in this batch
19	NLLT	= 0 add this batch to an existing lattice (LIB3) library = 1 start new lattice library (LIB3) Note: This refers only to "THERMOS and HAMLET" batches
21-54	BTTL	Hollerith title for batch output heading Lattice description cards for all cases in a batch

<u>Column</u>	<u>Name</u>	<u>Description</u>
		<u>Card 1</u>
4	NC	Card sequence number within a case (=1)
10-14	IDENT	Lattice identification number for lattice library tape LIB3
15-19	ITHMAX	THERMOS iteration maximum (default=150)
21-54	HOL	Hollerith lattice title
		<u>Card 2</u>
1	LCT	= 0 generally = 1 last card of case
3-4	NC	Card sequence number within a case (=2)
6-7	NGEOM	= 1 slab = 2 hexagonal = 3 square
8-9	NRX	Number of regions (maximum=20)
10-14	MX	Number of mixtures (maximum=10)
15-16	NP1B1	= 0 P-1 Fourier transform leakage calculation = 1 B-1 Fourier transform leakage calculation
17-18	NBCT	= 0 no scattering ring in THERMOS = 1 scattering ring in THERMOS (removed for HAMLET afterwards)
19	ISOXE	Number of foil materials to be edited (maximum=4), must not duplicate lattice unit cell materials
21-30	BSQD	Input buckling (m^{-2}) for Fourier transform leakage calculation
31-40	WSTBA (I),	Foil material numbers;
41-50	I=1, ISOXE	must not be materials with resonance profile tabulations
51-60		
61-70		

<u>Column</u>	<u>Name</u>	<u>Description</u>
		<u>Cards 3,4,.....</u>
1	LCT	= 0 generally = 1 last card of case
3-4	NC	Card sequence number within a case
6-7	NR	Region sequence number starting from 1 for central region of cell
8-9	MXAS	Mixture number associated with this region (need not be in order). When a new MXAS numbers appears for the first time either the fields marked by*, or by **, or both, must be filled in. (For subsequent appearances of this mixture number the data *and ** are omitted)
10-14	MR*	Predefined material number (see Appendix 1)
15-16	ISOXA**	Number of isotopes to be added to the predefined material, or number of isotopes in mixture if MR is blank. Follow this card by ISOXA added Isotope cards.
17-18	NPT	Number of spatial mesh points assigned to this region (If left blank, the code will compute a value provided THERMOS is to be run).
19	ILHI	0 = thermal neutron upscattering is ignored 1 = thermal neutron upscattering is taken into account
21-30	THI	Region outer diameter or slab thickness in inches (For cylindrical geometry a negative number for the outermost region denotes the lattice pitch in inches, but this option is restricted to the case when the scattering ring is absent. For slab geometry the innermost and outermost region thicknesses are distances to the reflecting boundaries).
31-40	D*	Mixture density (g/cc)
41-50	p*	Weight percent of secondary component in this material, exclusive of added isotopes, if any (see p.5)

<u>Column</u>	<u>Name</u>	<u>Description</u>
51-60	DEGC*	Region temperature (°C)
61-70	FISD	Relative thermal fission density in the different lattice regions for the epithermal analysis (normalised in the code to unit source for the entire unit cell by volume weighting). It is superfluous when THERMOS is run, since THERMOS calculates FISD. (If there is no thermal fission, or if FISD is left blank for all lattice regions in a "HAMLET only" case, the fission source is taken to be flat throughout the unit cell in HAMLET).
		<u>Added isotope cards, one for each added isotope</u> (Omit if ISOXA=0)
1	LCT	= 0 generally = 1 last card of case
3-4	NC	Card sequence number within a case
21-30	WSTBA	Isotope ID (must be one of the isotopes on thermal and/or epithermal library tapes).
31-40	WSTBB	Thermal temperature/model index (corresponding to isotope WSTBA; the pair of identifications must correspond to one of the materials on the thermal library tape; in general WSTBB=0.0 for heavy isotopes).
41-50	W	Weight fraction of this isotope in Total Mixture (see p. 5-5) Omitted if CONCTA is specified (see below). Can be used only if predefined material is specified on the lattice region description card.
51-60	A	Atomic weight of this isotope. Omitted if CONCTA is specified (see below). Can be used only if predefined material is specified on the lattice region description card.

<u>Column</u>	<u>Name</u>	<u>Description</u>
61-70	CONCIA	Concentration (atoms per barn cm). In this case D on the lattice region description card (if specified) is exclusive of this isotope. Omitted if W and A above are specified.
Repeat lattice region description card, and added isotopic cards (if any) for all lattice regions.		
Repeat complet lattice input from Card 1 for all lattices in a batch.		
<u>Resonance absorption cards for each case in the batch.</u>		
1-10	C1	Fractional reduction to be applied to resonance integrals calculated by the Nordheim method (ZUT and TUZ) for the first resonance nuclide encountered in the lattice, which must be nuclide 1 in the nuclide list.
11-20	C2	The same for the second resonance nuclide, which must be nuclide 2 in the nuclide list.
21-25	N1	Break point for first broad group of two group epithermal edit. (The two broad groups cover MUFT groups 1 through N1 and N1+1 through 54).
26-30	N2	Break point for first broad group of three group epithermal edit.
31-35	N3	Break point for second broad group of three group epithermal edit. (1 through N2, N2+1 through N3, N3+1 through 54).
36-40	MSHPR	Number of intervals per unit lethargy for collision density calculation in resolved resonance region when using resonance profiles (see Appendix A-2).
41-45	LXPR	Used to specify lethargy mesh for reaction rate calculations (see Appendix A-2).

<u>Column</u>	<u>Name</u>	<u>Description</u>
45-50	INO	<p>= 0 effective resonance integrals calculated separately for each MUFT resolved resonance group by Nordheim integral treatment using resonance profile tabulations when available</p> <p>= 1 the same as 0 but cumulatively for all resolved resonance groups</p> <p>= 2 resonance reaction rates calculated separately for each MUFT resolved resonance group by RABBLE type treatment for nuclides with resonance profile tabulations</p> <p>= 3 the same as 2 but cumulatively for all resolved resonance groups</p> <p>= 4 overwrite HAMMER resolved resonance treatment. Follow this card by the OZMA-1 output deck which corresponds to the current case (see Appendix A-3).</p> <p>= 5 overwrite HAMMER resolved resonance treatment. Follow this card by a REPC output deck which corresponds to the current case (see Appendix A-4).</p>
51-55	IRSC	<p>= 0 skip resonance scattering corrections in subroutine RESC</p> <p>= 1 compute resonance scattering corrections in subroutine RESC</p> <p><u>First RABPRO card</u> (Omit unless INO=2 or 3)</p>
1-5	NXR	<p>Collapse the unit cell subregions surrounding the space points as specified in CAPN into NXR coarse subregions.</p>

<u>Column</u>	<u>Name</u>	<u>Description</u>
6-10	NFR	Of the NXR coarse cell subregions the first NFR lie in the fuel.
11-15	MIBV	Maximum length of each "back value" table for collision density calculation. Can be estimated from $MSHPR * \ln(1/\alpha)$ for the different isotopes except Hydrogen.
15-20	MICP	Escape probabilities through inner and outer surfaces of each coarse subregion are stored for interpolation at MICP points in the optical thickness range from 0 to 20.0. Note: At present MICP=1001 must be used unless subroutine PIJTNT, which is based on the original subroutine PCALC of HAMMER, is modified appropriately.
21-25	ITRM	Maximum number of source iterations at each lethargy point for which the collision density is computed. Note: ITRM=4 is generally sufficient for relative convergence of 10^{-4} for the collision density calculated in all coarse subregions.
		<u>Second RASPRO card</u> (Omit unless INO=2 or 3)
Format (2013)		Last unit cell subregion as specified in CAPN for each of the NXR coarse subregions.

Os dados de entrada para o programa HAMMER-TECHNION referente ao cálculo das razões entre taxas de reação (ρ_{28}, σ_{25} e σ_{28}) e o colapsamento por super-região são fornecidos a seguir:

OTHERS= 0 OR BLANK

2. TWO

COL 1-10= WA ID NUMBER FOR FERTILE MATERIAL (92238.)

11-20= WA ID NUMBER FOR FISSILE MATERIAL (92235.)

3. THREE

COL 1-2 = NUMBER OF SUPER-REGION EDITS (THESE COMBINE 1 OR MORE OF THE HOMOGENEOUS REGIONS FROM PART E.)

4. FOUR (REPEAT FOR EACH SUPER-REGION)

COL 1-4=4 CHARACTER SUPER-REGION ID

5-64= UP TO 2013. EACH INTEGER BEING A REGION NUMBER FROM PART E TO BE INCLUDED IN THIS SUPER-REGION

HAMMER

13

Finalmente, apresenta-se na página seguinte os dados de entrada para execução dos cálculos referentes a queima do combustível.

CARTÕES DE ENTRADA PARA CITHAM-TECHNION

Após o último cartão do HAMMER (o cartão branco que sucede o cartão que contém "1" na coluna 1), inserir os cartões:

cartão 0 (A8) BURNUPØØ

cartão 1 (5I3) : NLB, NFILE, NLAT, NG, NDEF

NLIB - Nº da unidade do "Lattice Library Tape" (no JCL atual,)

NFILE - Nº de casos existentes na unidade NLIB previamente gravados (geralmente NFILE=0, ver coluna 19 do cartão tipo 1 do HAMMER).

NLAT - Nº de casos a serem gravados na unidade 12, no formato CITATION.

NG - (optional) Nº de grupos para o esquema de colapso.

NDEF - Nº de definições do isótopo do CITATION (além da fita 13), inseridos a seguir no formato: (I3,IX, A8,3E12.0)

(inserir cartão 2 NLAT vezes)

cartão 2: IL, WSØ (I3,E9.0)

IL - Ordem em que se encontra na unidade NLIB o caso a ser convertido para o formato CITATION na unidade 12.

WSØ - Identificação do nuclídeo (esquema HAMMER) para o qual serão consideradas as seções de choque total (σ_t) e seções de choque de remoção (σ_{rg}) do sistema.

cartão 3 (I3,E9.0, I3): NTIMX, POWER, NCASE (último cartão se NTIMX=0)

NTIMX - Nº de "time-steps" a serem calculados

POWER - Densidade de potência (Watt/cm³)

NCASE - Nº de casos (necessário só se NTIMX=0, se NTIMX≠0 só um caso é permitido).

cartão 4 (2I3): KTIMEO, KTIME

KTIMEO - Nº de dias para o primeiro "time-step" (recomenda-se KTIMEO=2)

KTIME - Nº de dias para os demais "time-steps"

cartão 5 (opcionais) (2(I3,E9.0)): NC1, XC1, NC2, XC2

Se NC1=1 - Multiplicar a concentração homogeneizada do nuclídeo XC1 por XC2 a cada NC2 "time-steps"

=2 - Adicionar XC2 à concentração homogeneizada do nuclídeo XC1 a cada NC2 "time-steps"

=3 - O nuclídeo XC1 será tratado como veneno queimável (não há necessidade de NC2 nem XC2)

XC1 - Identificação do nuclídeo (esquema HAMMER)

NC2 - Nº de "time-steps" (se NC1=1 ou 2)

XC2 - Modificação de concentração (se NC1=1 ou 2).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Barry, R, F.; "LEOPARD - A Spectrum Dependent Non-Spatial Depletion Code for the IBM-7094", Atomic Power Division, Westinghouse Electric Corp., WCAP-3269-26, Sept. 1963.
2. SUICH, J.E., HONECK, H.C., "The HAMMER System", DP-1064, Savannah River Laboratory (1967).
3. Barhen, J., Rothenstein, W. and Taviv, E., "The HAMMER Code System", EPRI-NP-565 (1978).
4. Askew, et. ali. "A General Description of the Lattice Code WIMS", J. Brit. Nucl. Energy Soc., 1965, 5, 564.
5. Honeck, H.C., "A Thermalization Transport Theory Code for Reactor Lattice Calculations", BNL-5826, Brookhaven National Laboratory (1962).
6. Kih, P. H., Robba, A.A., "RABBLE - A Program for Computation in Multiregion Reactor Cells", ANL 7326, (1967).
7. Nordheim, L. W., and G. F. Kunier, "A Program of Research and Calculations of Resonance Absorption", GA-2527 (1961).
8. Bohl, et al., "MUFT-4 Fast Neutron Spectrum Code for the IBM-704, "WAPD-TM-72 (July, 1957).
9. Honeck, H. C., FINCH, D. R., "Flange-II (Version 71-1), A Code to Process Thermal Neutron Data from an ENDF-152 (1971).
10. Wigner, E.P., and J.E. Wilkings, Jr., "Effect of the Temperature of the Moderator on the Velocity Distribution of Neutrons with Numerical Calculations for Hydrogen as Moderator", AECD-2275 (1944).
11. Aronson, A., Rothenstein, W., "ETOG-3 Modifications for HAMMER with ENDF/B-IV Data", BNL Memorandum, Department of Nuclear Engineering, Technion, Israel Institute of Technology (1976); Supplement (1977).
12. Fowler, T.B.; Vondy, D.R.; Cunningham, G.W., Nuclear Reactor Core Analysis Code: CITATION. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, July 1971. (ORNL-TM-2496, Rev.2).