1
Indústrias Nucleares do Brasil

A INB (Indústrias Nucleares do Brasil)[2] é uma empresa de economia mista, vinculada à Comissão Nacional de Energia Nuclear - (CNEN) e subordinada ao Ministério da Ciência e Tecnologia. Está presente nos estados da Bahia, Ceará, Minas Gerais e Rio de Janeiro, participando ativamente, junto à sociedade brasileira, com o desenvolvimento de importantes projetos tecnológicos para geração de energia nucleoelétrica.

Responde pela exploração do urânio, desde a mineração e o beneficiamento primário até a produção e montagem dos elementos combustíveis que acionam os reatores de usinas nucleares. O conjunto dessas atividades constitui o Ciclo do Combustível Nuclear. Atua também na área de tratamento físico dos minerais pesados com a prospecção, pesquisa, lavra, industrialização, comercialização das areias monazíticas e obtenção de terras-raras.

No estado do Rio de Janeiro a INB esta presente em Resende, sul do estado do Rio de Janeiro, onde está a Fábrica de Combustível Nuclear (FCN). Nessa unidade industrial, de atividades pioneiras no país, estão localizadas a produção de pó e de pastilhas de dióxido de urânio, ver Fig.1, a produção de componentes e a montagem do elemento combustível, ver Fig.2, a área administrativa da empresa e o centro zoobotânico.

Figura 1 - FCN-2 Fábrica de Reconversão e Pastilhas[2].

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0220981/CA

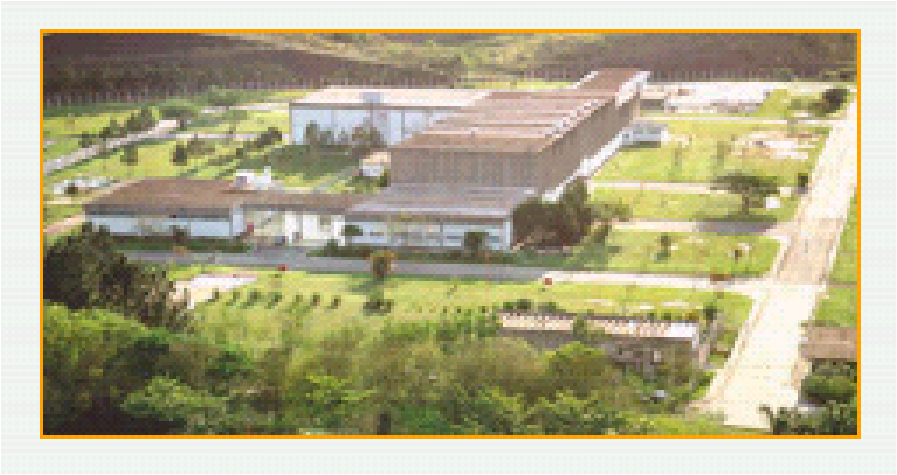

Figura 2 - FCN-1 – Fábrica de componentes e montagem do elemento combustível[2].

1.1.
Ciclo do Combustível Nuclear

O Ciclo do Combustível Nuclear é o conjunto de etapas do processo industrial que transforma o mineral urânio, desde quando ele é encontrado em estado natural até sua utilização como combustível, dentro de uma usina nuclear.

O ciclo consiste das seguintes etapas:

1.1.1.Mineração e Beneficiamento

A mineração e o beneficiamento de urânio no Brasil é feito na INB-Caetité, que se localiza na Bahia, a sudoeste do estado, próximo aos municípios de Caetité e Lagoa Real, onde está situada uma das mais importantes províncias uraníferas brasileiras, ver Fig.3. As reservas são estimadas em 100.000 toneladas, exclusivamente de urânio, sem outros minerais de interesse associados, sendo este fato determinante para a INB optar por sua exploração. Esta quantidade é suficiente para o suprimento da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (usinas Angra I, II e III) por 100 anos e a continuidade das atividades de pesquisa e de prospecção pode aumentá-la substancialmente.

Com capacidade de produção de 400 toneladas/ano de concentrado de urânio, a meta da INB para os próximos anos é a sua duplicação para 800 toneladas/ano.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0220981/CA

Figura 3 INB-Caetité – Mineração e beneficiamento de urânio[2].

Esta unidade de beneficiamento de minério de urânio é um empreendimento mínero-industrial modular, concebido com a finalidade de promover o aproveitamento do urânio em cerca de 33 ocorrências que compõem a reserva atualmente conhecida.

O processo de beneficiamento do minério de urânio é o de lixiviação em pilhas (estática). Depois de britado, o minério é disposto em pilhas e irrigado com solução de ácido sulfúrico para a retirada do urânio nele contido. Esta técnica dispensa fases de moagem, agitação mecânica e filtração, permitindo, além de uma substancial redução nos investimentos, uma operação a custos menores, em face do reduzido número de equipamentos e unidades operacionais envolvidos.

A concentração do urânio é realizada pelo processo de extração por solventes orgânicos, seguidos da separação por precipitação, secagem e acondicionamento em tambores. O concentrado de urânio (U_3O_8) é denominado "yelowcake", ver Fig.4.

Figura 4 - Concentrado de urânio, denominado "yelowcake"[2].

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0220981/CA

1.1.2.Conversão

Na usina de conversão, o urânio sob a forma de yellowcake, é dissolvido e purificado, obtendo-se então o urânio nuclearmente puro. A seguir, é convertido para o estado gasoso, o hexafluoreto de urânio (UF_6), ver Fig.5, para permitir a transformação seguinte: o enriquecimento isotópico. Essa etapa do ciclo do combustível nuclear é a única que não é realizada no Brasil.

Figura 5 – Cilindro contendo o gás hexafluoreto de urânio (UF_6)[2].

1.1.3.Enriquecimento

O processo de enriquecimento é a parte mais importante do ciclo do combustível nuclear, e sua tecnologia é controlada em qualquer parte do mundo, por este motivo, o enriquecimento do urânio Brasil é realizado no exterior. Mas em 2002, o Centro Tecnológico da Marinha de São Paulo (CTMSP) em parceria com o Instituto de Pesquisas Energéticas de São Paulo, da ESP, conseguiram desenvolver, com tecnologia totalmente nacional, o enriquecimento de urânio utilizando a tecnologia de ultracentrifugação em escala industrial.

A primeira fábrica do Brasil de enriquecimento de urânio será montada em parte das instalações existentes da INB-Resende.

O Contrato entre a INB e o Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo (CTMSP) prevê um projeto com implantação modular e a instalação da 1ª cascata para o segundo semestre de 2004.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0220981/CA

O processo de enriquecimento por ultracentrifugação é um processo físico de separação dos isótopos do urânio, este processo é necessário porque, na natureza o urânio possui dois isótopos: o U_{235}, na proporção de 0,72%, mais leve e que produz a fissão nuclear, e o U_{238}, na proporção de 99,3%. O enriquecimento consiste em aumentar a concentração do isótopo U_{235} de 0,72% para cerca de 4%.

Este processo é realizado colocando-se o gás de hexafluoreto de urânio em ultracentrífugas, que ao girar em alta rotação faz com que o isótopo mais pesado do urânio, U_{238}, fique colado na parede da ultracentrífuga, enquanto que o isótopo mais leve o, U_{235}, fique próximo do centro, onde então, é retirado.

1.1.4.Reconversão

O gás hexafluoreto de urânio (UF_6), agora enriquecido com um teor de aproximadamente 4% de isótopo físsil, é transformado em pó de dióxido de urânio (UO_2), ver Fig.6, em um processo totalmente químico. Este processo é realizado na FCN-Reconversão, ver Fig.1.

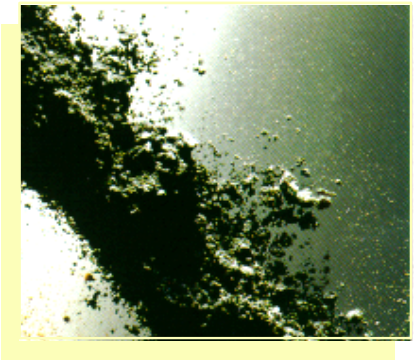

Figura 6 – Pó de dióxido de urânio (UO_2)[2].

A FCN-Reconversão foi projetada para operar em escala comercial variável.

A fábrica de pó de dióxido de urânio (UO_2) tem uma capacidade nominal de 160t/ano. Funciona como unidade de produção independente e alimenta a fábrica de pastilhas.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0220981/CA

1.1.5.Processo de fabricação de pastilhas

A fabricação de pastilhas de dióxido de urânio, ver Fig.7, é feita na FCN-Pastilhas. A fábrica foi projetada para operar em escala comercial variável, e tem uma capacidade nominal de 120t/ano. Funciona como unidade de produção independente e é alimentada pela fábrica de pó de dióxido de urânio (UO_2). As pastilhas, que possuem a forma de um cilindro, com um centímetro de comprimento e de diâmetro, são a síntese de um longo processo minério-químico-industrial e também a matéria-prima que, em 400 unidades, preenchem os tubos de zircaloy que integram cada uma das 235 varetas que constituem um elemento combustível na FCN - Componentes e Montagem. Apenas duas pastilhas geram energia para manter uma residência média funcionando por um mês.

Figura 7 – Pastilhas de dióxido de urânio[2].

O processo de produção de pastilhas é realizado da seguinte forma: primeiro o pó de dióxido de urânio é prensado em uma prensa rotativa, ao sair da prensa já possui a forma de uma pastilha, denominada "pastilha verde", em seguida estas pastilhas verdes são conduzidas ao forno de sinterização, para aumentar sua densidade. Após saírem do forno, as pastilhas sinterizadas são conduzidas para a retífica, onde se completa o processo de produção de pastilhas de dióxido de urânio, ver Fig.8.

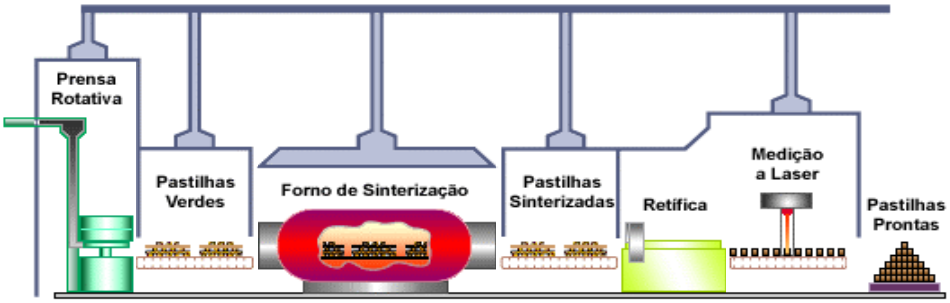

Figura 8 – Processo de fabricação de pastilhas de dióxido de urânio[2].

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0220981/CA

1.1.6.Elemento Combustível

A fabricação do elemento combustível é feita na FCN-Componentes e Montagem do Combustível Nuclear, uma das mais modernas existentes no mundo para a produção de combustível nuclear destinado a reatores de água pressurizada (PWR), para montagem mecânica de precisão e para a fabricação de componentes. Com capacidade nominal de 250t anuais de urânio (U), cerca de 100t de urânio são suficientes para a primeira carga de um reator de 1.300MWe ou para recargas anuais de até três reatores.

A fabricação do elemento combustível envolve uma alta sofisticação em precisão mecânica e garantia da qualidade. Equipamentos de ultra-som, raios X, soldas especiais, medições a laser, microscópios e outros recursos sofisticados são comumentes utilizados em seu processo de produção e controle.

O Elemento Combustível, ver Fig.9, é composto pelas pastilhas de dióxido de urânio montadas em tubos de uma liga metálica especial - o zircaloy - formando um conjunto de varetas, cuja estrutura é mantida rígida, por reticulados chamados grades espaçadoras.

Os vários elementos combustíveis, inseridos no núcleo do reator, geram calor que será transformado em energia elétrica. Cada elemento combustível, supre de energia elétrica 42000 residências de porte médio, durante um mês.

Elemento Combustível	Angra 1	Angra 2
quantidade	121	193
varetas	28.435	45.548
pastilhas	10,5 milhões	17,5 milhões
comprimento	4,00m	5,00m
peso - urânio	411 kg	543 kg
peso - total	600 kg	840 kg

Figura 9 – Bocal inferior, grade espaçadora e varetas de um elemento combustível[2].

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0220981/CA

1.2.
Sinterização de pastilhas de dióxido de urânio

A sinterização é um processo no qual ocorre a coalescência de partículas de um agregado de material prensado, mantido a uma determinada temperatura, através da difusão atômica[3].

O mecanismo de sinterização é esquematicamente ilustrado na Fig.10. Após a prensagem de pequenas partículas de dióxido de urânio com dimensão de 0,1mm a 0,2mm, muitas dessas partículas estão uma em contato com a outra e durante o estágio inicial da sinterização, formam-se pescoços ("necks"[3]) ao longo do contato entre partículas adjacentes (Fig.10 (a)), então se forma um contorno de grão dentro de cada pescoço e os interstícios entre as partículas se tornam poros (Fig.10 (b)). Com o progresso da sinterização os poros tornam-se menores e mais esféricos (Fig.10 (c)). Após a complementação de todo o processo, há uma significativa redução da porosidade, o aumento da densidade e a melhora na integridade mecânica do agregado de partículas prensadas, ou seja, das pastilhas de dióxido de urânio.

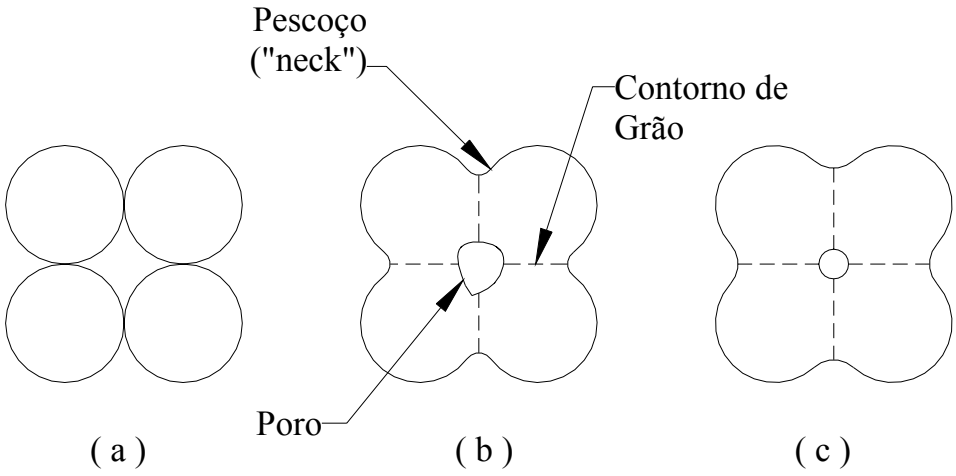

Figura 10 – Mecanismo esquemático de sinterização de partículas.

A sinterização é realizada em uma temperatura bem abaixo do ponto de fusão do dióxido de urânio, cujo ponto de fusão é de aproximadamente 2600°C. A temperatura de sinterização deve estar dentro do intervalo de 1700°C a 1750°C.

A Fig.11 mostra o gráfico que evidencia o aumento de densidade teórica da pastilha de dióxido de urânio sinterizada onde, partindo-se de uma densidade de prensagem de aproximadamente 50% da densidade teórica, definida pela

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0220981/CA

geometria da pastilha quando deixa a prensa, pode-se produzir um corpo de alta densidade, com mais de 95% da densidade teórica.

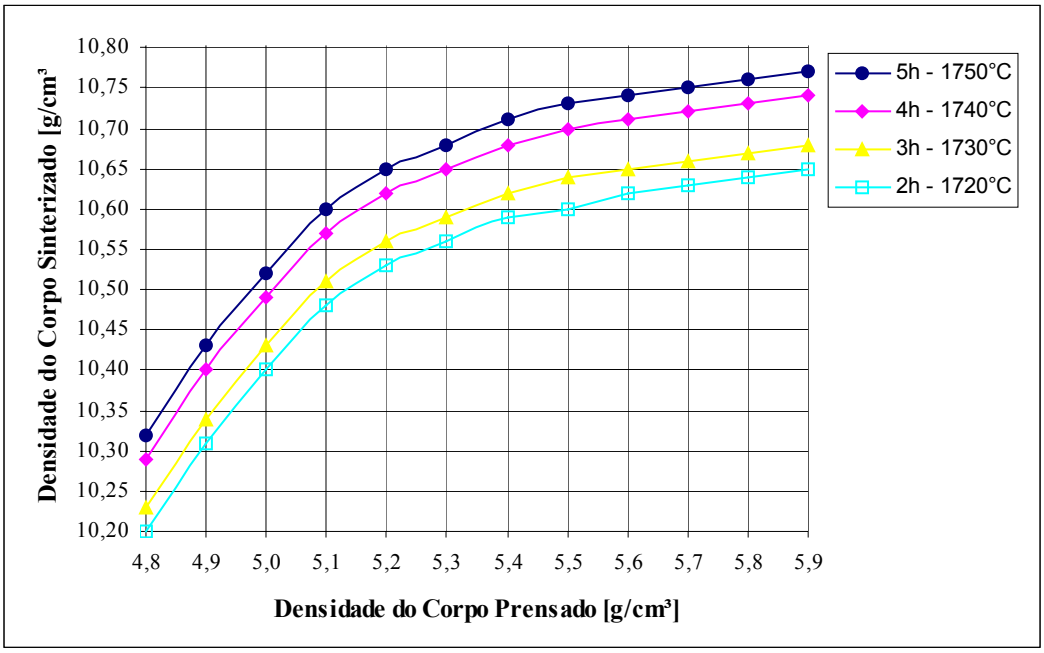

Figura 11 – Variação de densidade de uma pastilha de dióxido de urânio sinterizada em função da temperatura e do tempo.

Pela Fig.11, pode-se notar que a temperatura de sinterização, em conjunto com a densidade de prensagem e o tempo de sinterização, formam a dimensão determinante para a correta produção de pastilhas de dióxido de urânio conforme as especificações de projeto.

Na INB, a sinterização de pastilhas de dióxido de urânio é realizada em um forno especial, suas principais características serão descritas a seguir.

1.3. Forno de sinterização

Na Fábrica de Combustível Nuclear–Pastilhas para efetuar o processo de sinterização de pastilhas de dióxido de urânio são utilizados dois fornos empuxadores elétricos, de trabalho contínuo, do tipo GWSmo 16/14/210[4] do fabricante DEGUSA/Brasimet, ver Fig.12.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0220981/CA

O forno de sinterização empuxador consiste de um canal de aproximadamente 6m, com uma atmosfera redutora, com gás hidrogênio, este é conduzido sobre o sinterizado dentro do princípio de contra corrente e, em seguida, queimado. A vazão total de hidrogênio é de aproximadamente $8m^3/h$.

O hidrogênio oferece ao forno uma atmosfera redutora, a qual evita a oxidação das resistências de aquecimento e ainda promove a redução de U_3O_8 para UO_2.

Figura 12 – Forno de sinterização de pastilhas de dióxido de urânio (UO_2)[2].

As principais regiões do forno são mostradas na Fig.13.

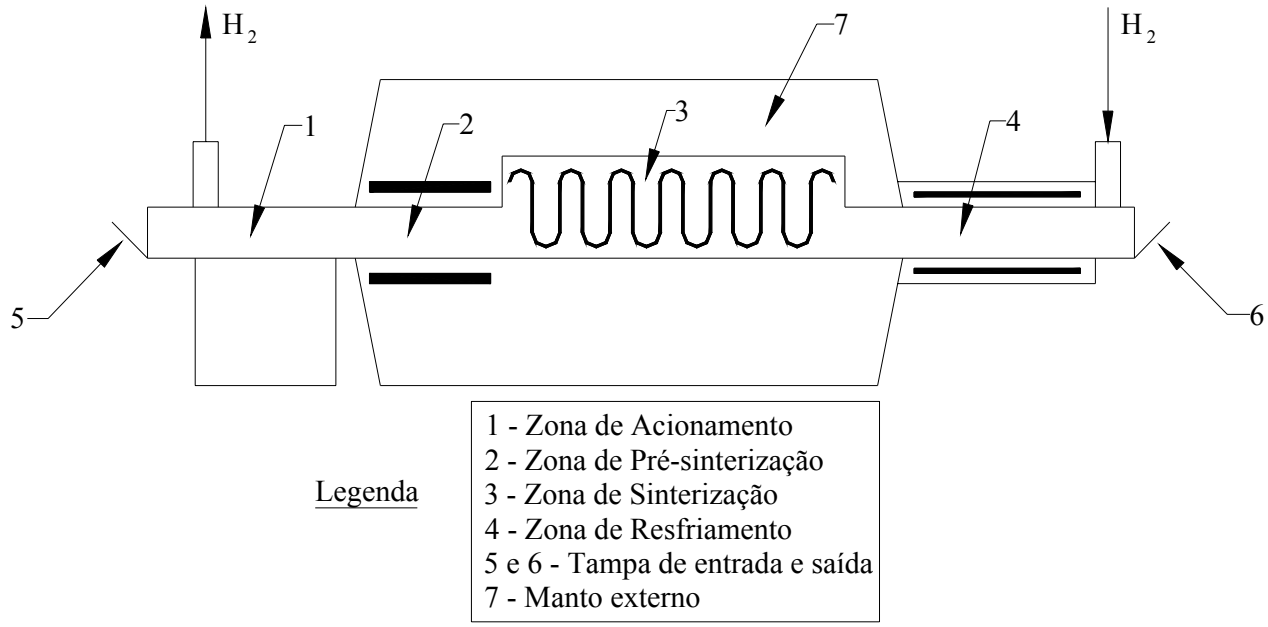

Figura 13 – Desenho esquemático de construção do forno de sinterização[4].

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0220981/CA

1.3.1.Zona de Acionamento

É onde se localiza o sistema principal de transporte para inserção e recuo das navetas, ver Fig.14, com pastilhas de dióxido de urânio prensadas no interior do canal do forno, este sistema é comandado por um cilindro pneumático.

As navetas são introduzidas uma a uma, e deslizam sobre o canal do forno, uma impulsionando a outra, e são lateralmente guiadas pelas paredes laterais do canal.

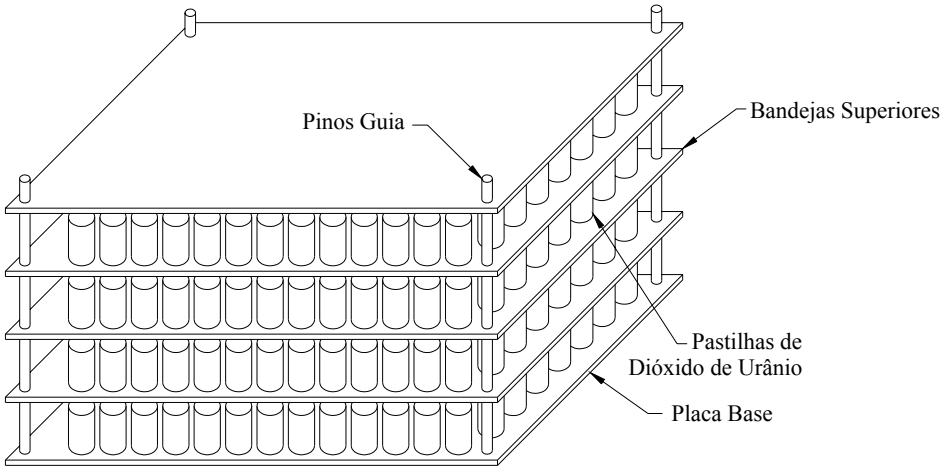

Figura 14 – Desenho esquemático das navetas com pastilhas de dióxido de urânio[4].

1.3.2.Zona de Pré-Sinterização

Possui um comprimento de 800mm, onde existem dois circuitos que utilizam como elementos de aquecimento, várias espiras de NiCr/Ni, encaixadas nas canaletas do refratário, que é feito de óxido de alumina puro. A potência nominal é de 12000W.

Nesta zona a temperatura de trabalho fica em torno de 500°C a 600°C, o controle desta temperatura é feito através de um controlador microprocessado acoplado a um termopar do tipo K.

Na zona de pré-sinterização ocorre a volatização de qualquer contaminante, evitando assim a deposição dos mesmos nos elementos de aquecimento da zona de sinterização.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0220981/CA

1.3.3.Zona de Sinterização

Possui um comprimento de 2100mm, onde existem três circuitos que utilizam como elementos de aquecimento, feixes de arames de molibdênio em forma de laço, suspenso em ganchos do próprio material. Toda a zona de sinterização é feita de tijolos refratários de alumina pura.

Nesta zona a temperatura de trabalho é de 1750°C, o controle desta temperatura é feito através de um controlador microprocessado acoplado a um termopar do tipo C. A potência nominal é de 90000W. É a principal região do forno, ver Fig.15 e 16 mostram detalhes desta região.

Nesta zona existem três janelas de inspeção com vidros de 5mm de espessura por onde é possível medir a temperatura das navetas com pastilhas de dióxido de urânio com o auxílio de um termômetro de radiação infravermelha.

O eixo de simetria de cada janela de inspeção coincide com o eixo de simetria dos locais onde são instalados os termopares que controlam a temperatura desta zona. O comprimento de cada termopar é de 635mm.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0220981/CA

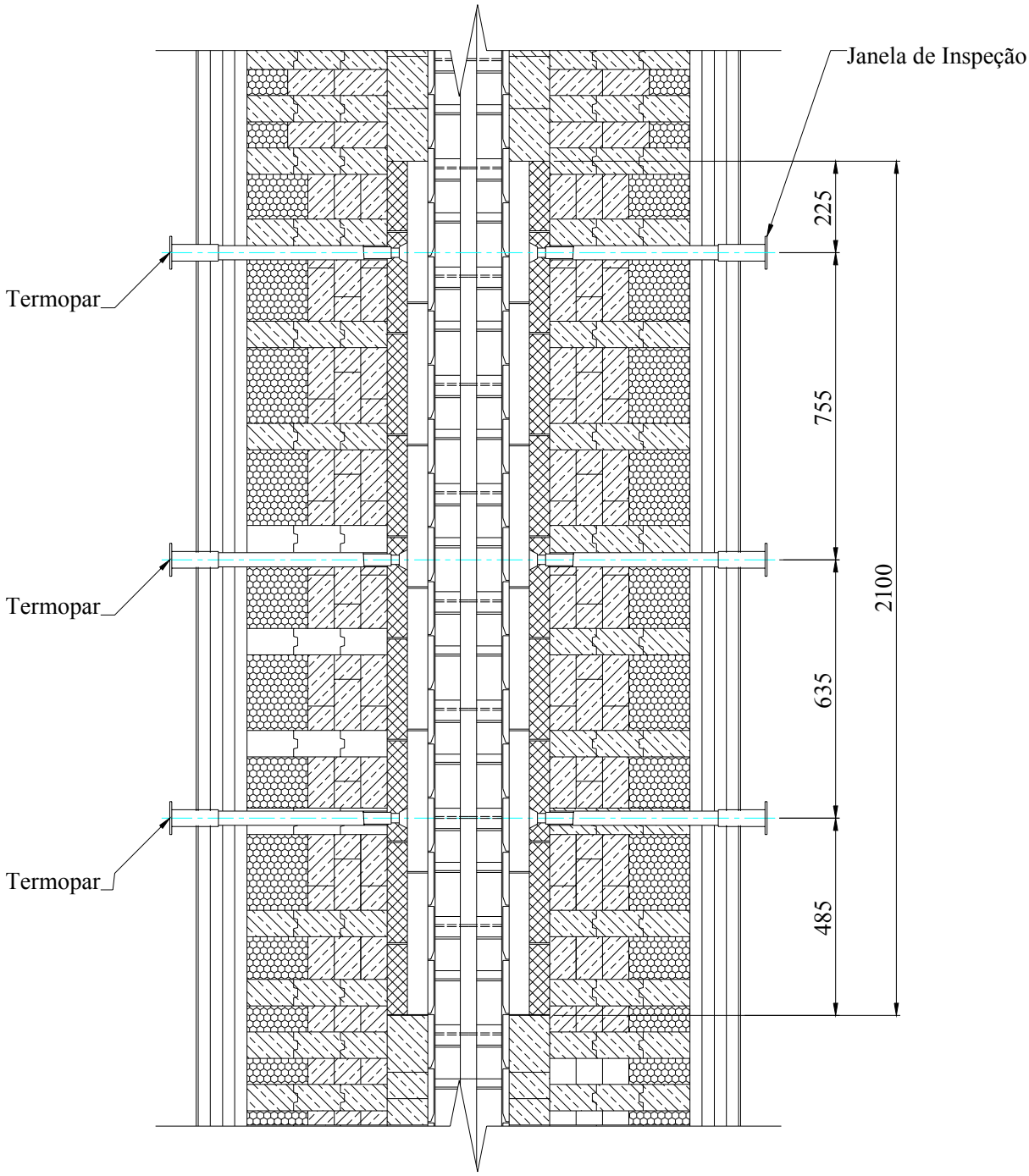

Figura 15 – Vista superior em corte da região de sinterização, as áreas hachuradas são tijolos refratários, as dimensões estão em milímetros.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0220981/CA

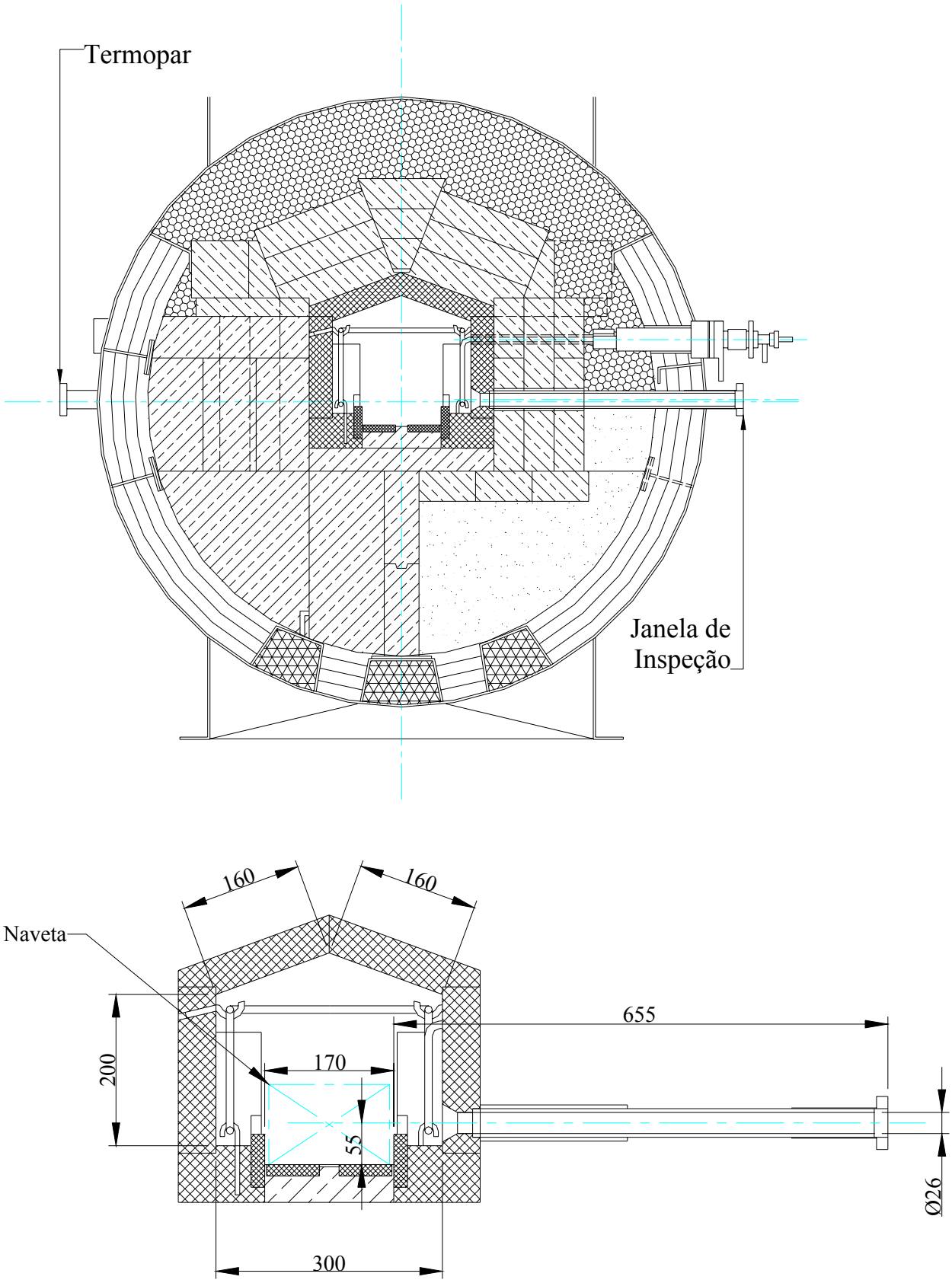

Figura 16 – Vista lateral em corte e detalhe do canal de sinterização, as dimensões estão em milímetros.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0220981/CA

1.3.4.Zona de Resfriamento

Possui um comprimento de 900mm, onde ocorre o resfriamento das navetas para serem retiradas do forno de sinterização. O resfriamento do canal é acelerado com o auxílio de um trocador de calor, o fluido de resfriamento é a água.

1.3.5.Tampa de Entrada

É a escotilha que lacra o forno de sinterização para não ocorrer vazamento de hidrogênio, é selada e seu sistema de acionamento é automático.

1.3.6.Tampa de Saída

É a escotilha que lacra o forno de sinterização para não ocorrer vazamento de hidrogênio, é selada e seu sistema de acionamento é automático.

1.3.7.Carcaça do Forno

Envolve as regiões de pré-sinterização e de sinterização. Compõe-se basicamente de um cilindro de aço (estanque) a prova de gás, duas tampas móveis que permitem a montagem e desmontagem do sistema de aquecimento, refratários e do isolante térmico.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0220981/CA