



**Filipa Vaz Campos Lourenço**

Licenciatura em Engenharia Física

**A Reacção Nuclear  $^{23}\text{Na}(p,p'\gamma)^{23}\text{Na}$  -  
Optimização da Linha de PIGE do  
Acelerador Tandem de 3 MV da UFA-ITN**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Física

Orientador: João Cruz, Prof. Doutor, FCT/UNL  
Co-orientadora: Micaela Fonseca, Doutora, FCT/UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Orlando Manuel Neves Duarte Teodoro  
Arguente: Prof. Doutor Rui Manuel Coelho da Silva  
Vogal: Prof. Doutor João Duarte Neves Cruz



**Filipa Vaz Campos Lourenço**

Licenciatura em Engenharia Física

**A Reacção Nuclear  $^{23}\text{Na}(p,p'\gamma)^{23}\text{Na}$  -  
Optimização da Linha de PIGE do  
Acelerador Tandem de 3 MV da UFA-ITN**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Física

Orientador: João Cruz, Prof. Doutor, FCT/UNL  
Co-orientadora: Micaela Fonseca, Doutora, FCT/UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Orlando Manuel Neves Duarte Teodoro  
Arguente: Prof. Doutor Rui Manuel Coelho da Silva  
Vogal: Prof. Doutor João Duarte Neves Cruz



## Optimização da Linha de PIGE do Acelerador Tandem de 3 MV da UFA-ITN

*'Copyright'* em nome de Filipa Vaz Campos Lourenço, estudante do curso de Engenharia Física, da Faculdade de Ciência e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

## **Agradecimentos**

As minhas primeiras palavras de agradecimento vão para o Professor Doutor João Cruz, e para a Doutora Micaela Fonseca que assumiram a orientação científica deste projecto. O seu incansável apoio e disponibilidade durante todas as fases do trabalho foram determinantes para a sua conclusão.

À Professora Doutora Adelaide Pedro de Jesus que foi responsável pela minha iniciação na investigação de reacções nucleares, o seu constante apoio e disponibilidade durante a realização deste trabalho.

Ao Professor Doutor João Pires Ribeiro, pelo seu apoio na aquisição de dados e disponibilidade total no esclarecimento de dúvidas.

Ao Eng<sup>o</sup>. João Manteigas um agradecimento especial pela sua amizade, disponibilidade, cooperação e ajuda.

Ao Professor Doutor Rui Silva pela sua total disponibilidade e ajuda na resolução de problemas.

Ao Doutor Daniel Galaviz e a todos os membros do Grupo de Reacções Nucleares pela sua disponibilidade durante todo o tempo de aquisição de dados.

Ao Doutor Luís Cerqueira Lopes, pelo seu apoio na área da electrónica.

Ao Doutor Luís Ferreira, pela disponibilidade dos equipamentos.

Ao Doutor Rodrigo Mateus pelo seu apoio no estudo das reacções nucleares.

Ao Eng<sup>o</sup>. Hélio Luís pelo seu apoio na aquisição de dados e longo de todo o trabalho.

Ao Eng<sup>o</sup>. Sérgio Magalhães pelo seu apoio na aquisição dos espectros de RBS.

Ao Eng<sup>o</sup>. Nuno Fernandes e ao Eng<sup>o</sup>. Norberto Catarino pela sua amizade e cooperação.

À Técnica Filomena Batista e ao Sr. Manuel Cabaça pela sua disponibilidade total no apoio constante em todas as questões técnicas.

Ao Técnico Jorge Rocha pelo apoio incondicional em todos os aspectos técnicos do laboratório.

À Técnica Rute Pinheiro agradeço a disponibilidade e o apoio na preparação de amostras.

Aos investigadores e pessoal técnico do Instituto Tecnológico Nuclear pelo apoio durante o período de investigação.

A todas as pessoas que, de alguma forma, contribuíram para a concretização desta dissertação.

À minha família, por todo o carinho e apoio.

Dedico esta tese aos meus pais, à minha irmã e ao meu companheiro. Aos quais agradeço todo o encorajamento, o amor incondicional e as oportunidades que proporcionaram ao longo da vida.

## Resumo

A Emissão de Radiação Gama Induzida por Protões (PIGE) é uma técnica essencialmente usada para determinar as concentrações de elementos leves à superfície de uma amostra.

Na Unidade de Física e Aceleradores, do Laboratório de Feixe de Iões, do Instituto Tecnológico e Nuclear (UFA-LFI/ITN) em Sacavém, Portugal, estão instalados dois aceleradores de partículas, um Tandem de 3 MV e um Van de Graff de 2,5 MV, que permitem fazer estudos de reacções nucleares.

O principal objectivo deste trabalho é medir a secção eficaz total da reacção nuclear de dispersão inelástica de protões por  $^{23}\text{Na} - ^{23}\text{Na}(p,p'\gamma)^{23}\text{Na}$  - para efeitos do desenvolvimento da técnica PIGE, no intervalo de energias de 2100 a 4040 keV, no acelerador Tandem.

A secção eficaz da reacção nuclear  $^{23}\text{Na}(p,p'\gamma)^{23}\text{Na}$  medida anteriormente por diferentes autores [1, 2] apresenta discrepâncias que se traduzem numa incerteza elevada desta grandeza para as energias de interesse, justificando assim uma nova medição.

Neste trabalho determina-se a secção eficaz da reacção nuclear  $^{23}\text{Na}(p,p'\gamma)^{23}\text{Na}$ , na transição correspondente à emissão de um fóton de 440 keV. Para tal, tem que ser feita uma medição rigorosa da intensidade do feixe, o que implica o conhecimento do seu valor absoluto e também a sua reprodutibilidade.

Com intuito de otimizar a linha de PIGE foi dimensionado, construído e testado um novo sistema visor/medidor de intensidade de feixe, montado na linha de Reacções Nucleares/PIGE do acelerador Tandem. Este sistema permitiu facilitar a focagem e alinhamento do feixe que entra na câmara na linha de Reacções Nucleares/PIGE.

A técnica de PIGE permite complementar os conhecimentos que foram desenvolvidos por outras técnicas em várias áreas, tais como, do ambiente, dos materiais, das ciências da saúde, da conservação, restauro e geologia.

## Termos chave

PIGE, reacções nucleares induzidas por partículas carregadas, secção eficaz, sistema visor/medidor de intensidade de feixe.

## Abstract

Particle Induced Gamma-ray Emission (PIGE) is a technique essentially used to determine the concentrations of light elements on sample surfaces.

In the Nuclear and Technological Institute (UFA-LFI/ITN) in Sacavém, Portugal at the Unit of Physics and Accelerators of the Ion Beam Laboratory, there are two particle accelerators: the 3 MV Tandem accelerator and the 2,5 MV Van de Graff accelerator, which allow the study of nuclear reactions.

The main goal of this project is to measure the total cross section of nuclear inelastic scattering of protons by  $^{23}\text{Na} - ^{23}\text{Na} (p, p'\gamma) ^{23}\text{Na}$  - for the purposes of development of the technique PIGE in the energy range from 2100 to 4040 keV, with the Tandem Accelerator.

The cross-section of the nuclear reaction  $^{23}\text{Na}(p,p'\gamma)^{23}\text{Na}$ , in the transition corresponding to the emission of a 440 keV photon, is determined experimentally. To that end, the beam intensity must be measured rigorously, which implies knowledge of its absolute value and also its reproducibility.

In order to upgrade the PIGE line a new beam screen/meter system was dimensioned, built tested and mounted on the PIGE/Nuclear Reaction line of the Tandem accelerator. This system made it easier to focus the beam going into the chamber on the PIGE/Nuclear Reaction line.

PIGE allows complement the knowledge that were developed by other techniques in several areas such as environment, materials, health sciences, conservation, restoration and geology.

## Keywords

PIGE, charged-particle induced nuclear reactions, cross-section, beam screen/meter system.

## Índice de Matérias

1.	Introdução .....	1
2.	Fundamentos teóricos.....	3
2.1.	Reacções nucleares.....	3
2.1.1	Dispersão inelástica .....	4
2.1.2	Reacções directas .....	4
2.1.3	Reacções de núcleo composto.....	4
2.1.4	Ressonâncias .....	4
2.2.	Secção eficaz .....	5
2.3.	Poder de paragem .....	7
2.4.	Retrodispersão de Rutherford.....	8
2.5.	Emissão de radiação gama induzida por protões.....	11
2.5.1.	Metodologia utilizada na determinação experimental da secção eficaz .....	12
3.	A reacção $^{23}\text{Na}(p,p'\gamma)^{23}\text{Na}$ .....	15
4.	Equipamento, montagem e procedimento experimental .....	19
4.1	Acelerador Tandem .....	19
4.1.1	Princípio de funcionamento do acelerador Tandem.....	20
4.1.2.	Detector Ge (HP) .....	25
4.1.3	Cadeia electrónica de detecção .....	28
4.1.4.	Concepção, projecção e elaboração do sistema visor/medidor de feixe .....	30
4.2.	Preparação e metodologia experimental.....	33
4.2.1.	Preparação e elaboração do alvo fino .....	33
4.2.2.	Metodologia utilizada nesta experiência.....	34
5.	Resultados e sua análise .....	36
5.1.	Calibração em energia do acelerador Tandem .....	36
5.2.	Determinação da estequiometria do alvo.....	37
5.3	Determinação da secção eficaz total da reacção $^{23}\text{Na}(p,p'\gamma)^{23}\text{Na}$ .....	40

6. Conclusões .....	46
7. Referências bibliográficas .....	47

## Índice de Figuras

<b>Figura 2.1:</b> Representação esquemática de diferentes processos de reacção [35].	3
<b>Figura 2.2:</b> Representação esquemática da geometria de colisões de partículas com o alvo.	5
<b>Figura 2.3:</b> Diagrama esquemático da transmissão por um alvo fino. $\Delta E$ é a energia perdida e $\Delta x$ a espessura do alvo correspondente à densidade superficial $N$ .	7
<b>Figura 2.4:</b> Diagrama dos primeiros níveis de excitação do isótopo $^{23}\text{Na}$ [8].	12
<b>Figura 3.1:</b> Secção eficaz de 440 keV, medida por Mateus et al. [1], da reacção $^{23}\text{Na}(p,p'\gamma)^{23}\text{Na}$ no intervalo de energias $E_{\text{lab}}=1100$ e 2400 keV.	16
<b>Figura 3.2:</b> O diagrama dos estados excitados do núcleo composto, $^{24}\text{Mg}$ [1].	16
<b>Figura 3.3:</b> Comparação das secções eficazes determinadas por Mateus et al [1] e por Cacioli et al. [2] da reacção $^{23}\text{Na}(p, p'\gamma)^{23}\text{Na}$ , no intervalo de energias $E_{\text{lab}}= 2200-2400$ keV [8].	17
<b>Figura 4.1:</b> Acelerador Tandem de 3 MV da UFA-LFI/ITN.	19
<b>Figura 4.2:</b> Esquema do acelerador Tandem de 3 MV da UFA-LFI/ITN (Etapa de baixa energia).	20
<b>Figura 4.3:</b> Esquema da fonte de iões Duoplasmatrão 358 [12].	21
<b>Figura 4.4:</b> Esquema do Acelerador Tandem de 3 MV da UFA-LFI/ITN, linha de reacções nucleares/PIGE (Etapa de alta energia).	22
<b>Figura 4.5:</b> Gaiola de Faraday do novo sistema visor/medidor de intensidade de feixe, esquerda) antes de ser montada na linha; direita) depois de montada na linha vista pelo visor através da câmara de vídeo.	23
<b>Figura 4.6:</b> Fotografias do feixe realizadas pela câmara de vídeo situada na câmara de reacções nucleares, esquerda) com iluminação; direita) sem iluminação.	23
<b>Figura 4.7:</b> Interior da câmara de reacções nucleares, onde estão representados os detectores de Si MOVD e MOVE, o interruptor de feixe e canhão de electrões (que não foi utilizado neste trabalho).	24
<b>Figura 4.8:</b> Linha de Reacções Nucleares/PIGE do acelerador Tandem.	24
<b>Figura 4.9:</b> Esquema do sistema de vácuo da linha de Reacções Nucleares/PIGE do acelerador Tandem.	25
<b>Figura 4.10:</b> esquerda) Ajuste total da eficiência do detector de radiação $\gamma$ [8]; direita) Ajuste polinomial da eficiência do detector de radiação $\gamma$ simulada para a região de baixas energias [8].	27
<b>Figura 4.11:</b> Electrónica do sistema de detecção de radiação gama e de partículas carregadas utilizado nesta experiência.	28

<b>Figura 4.12:</b> Esquema utilizado para a electrónica do sistema de detecção de radiação gama e de detecção de partículas carregadas. ....	29
<b>Figura 4.13:</b> Sistema visor/medidor de intensidade de feixe esquerda) vista frontal, direita) vista de lado.....	30
<b>Figura 4.14:</b> Sistema visor/medidor de intensidade de feixe antes de ser montado na linha de Reacções Nucleares/PIGE. ....	31
<b>Figura 4.15:</b> Gaiola de Faraday do novo sistema visor/medidor de intensidade de feixe onde se pode ver o feixe a incidir na posição 1 ou na posição 2, conforme o pretendido... 31	31
<b>Figura 4.16:</b> Sistema visor/medidor de intensidade de feixe montado à entrada da câmara de reacção nucleares da linha de Reacções nucleares/PIGE. ....	32
<b>Figura 4.17:</b> Evaporadora do UFA-LFI/ITN.....	33
<b>Figura 5.1:</b> Recta de calibração em energia do acelerador Tandem.....	37
<b>Figura 5.2:</b> Espectro de RBS do alvo NaF/Ag para uma energia $E_{lab} = 1800$ keV, com um ângulo de incidência a $0^\circ$ e com o detector PIPS a $\theta_{lab} = 165^\circ$ , registado no acelerador Van de Graaff de 2,5 MV. ....	38
<b>Figura 5.3:</b> Espectro de RBS do alvo NaF/Ag , sem fundo, para uma energia $E_{lab} = 1800$ keV, com um ângulo de incidência a $0^\circ$ e com o detector PIPS a $\theta_{lab} = 165^\circ$ , registado no acelerador Van de Graaff de 2,5 MV. ....	39
<b>Figura 5.4:</b> Espectro de partículas carregadas para uma energia $E_{lab} = 2342,8$ keV, com um ângulo de incidência a $0^\circ$ e o detector PIPS a $\theta_{lab} = 157^\circ$ , adquirido no acelerador Tandem de 3 MV na linha de Reacções Nucleares/PIGE. ....	40
<b>Figura 5.5:</b> Espectro de radiação gama para uma energia $E_{lab} = 2342,8$ keV, adquirido no acelerador Tandem de 3 MV na linha de Reacções Nucleares/PIGE. ....	41
<b>Figura 5.6:</b> Função de excitação da emissão da radiação gama de 440 keV da reacção $^{23}\text{Na}(p,p'\gamma)^{23}\text{Na}$ no intervalo de energias de 2100 a 4040 keV, adquirido no acelerador Tandem de 3 MV na linha de Reacções Nucleares/PIGE. ....	42
<b>Figura 5.7:</b> Comparação entre as secções eficazes da risca de 440 keV da reacção $^{23}\text{Na}(p,p'\gamma)^{23}\text{Na}$ obtidas neste trabalho e obtidas por Mateus et al. [1] e por Caciolli et al. [2]. ....	43
<b>Figura 5.8:</b> Comparação entre as secções eficaz da risca de 440 keV da reacção $^{23}\text{Na}(p,p'\gamma)^{23}\text{Na}$ obtidas neste trabalho e obtidas por Mateus et al. [1] e por Caciolli et al. [2]. ....	44

## Índice de Tabelas

<b>Tabela 3.1:</b> Energia das ressonâncias (em keV) da reacção $^{23}\text{Na}(p,p'\gamma)^{23}\text{Na}$ medidas por Mateus et al. [1] e comparadas com as disponíveis na literatura, na altura da publicação dos estados excitados do nuclido $^{24}\text{Mg}$ [1]. .....	15
<b>Tabela 4.1:</b> Eficiência experimental determinada a partir das fontes radioactivas: $^{152}\text{Eu}$ , $^{56}\text{Co}$ e $^{133}\text{Ba}$ , calibradas em eficiência [15]. .....	27
<b>Tabela 4.2:</b> Energias das Principais Ressonâncias do Na e do F para o intervalo de energias incidente de 2100 a 4040 keV. ....	35
<b>Tabela 5.1:</b> Reacções nucleares utilizadas para a calibração do acelerador Tandem, onde $\Gamma$ é a largura natural da ressonância. Para as ressonâncias de 2914 keV e 3660 keV não existe informação disponível sobre $\Gamma$ . ....	36
<b>Tabela 5.2:</b> Razões entre a secção eficaz medida neste trabalho e a secção eficaz medida por Mateus et al. [1] para o alvo de NaF/Ag. ....	43
<b>Tabela 5.3:</b> Razões entre a secção eficaz medida neste trabalho e a secção eficaz medida por Caciolli et al. [2] para o alvo de NaF/Ag. ....	43

## Lista de Siglas e Acrónimos

AMS	Espectroscopia de Massa por Aceleradores (do Inglês, <i>Accelerator Mass Spectrometry</i> )
CFNUL	Centro de Física Nuclear da Universidade de Lisboa
ERD	Detecção por Recuo Elástico (do Inglês, <i>Elastic Recoil Detection</i> )
IBA	Análise de Feixe de Iões (do Inglês, <i>Ion Beam Analysis</i> )
LUNA	Laboratory for Underground Nuclear Astrophysics
NRA	Análise de Reacções Nucleares (do Inglês, <i>Nuclear Reactions Analysis</i> )
PIGE	Emissão de Radiação Gama Induzida por Protões (do Inglês, <i>Proton Induced Gamma-ray Emission</i> )
PIPS	Detector de silício do tipo barreira de superfície (do Inglês, <i>Passivated Implanted Planar Silicon</i> )
PIXE	Emissão de Raios-X Induzida por Protões (do Inglês, <i>Proton Induced X-ray Emission</i> )
RBS	Retrodispersão de Rutherford (do Inglês, <i>Rutherford Backscattering Spectrometry</i> )
UFA-LFI/ITN	Unidade de Física e Aceleradores, do Laboratório de Feixe de Iões, do Instituto Tecnológico e Nuclear

## Lista de Símbolos

$\Omega$	Ângulo sólido
$(\theta, \phi)$	Ângulos do sistema de coordenadas esféricas
$I_a$	Intensidade do feixe de partículas com que as partículas atingem o alvo
$R$	Taxa de produção de partículas
$r(\theta, \phi)$	Distribuição angular de emissão de partículas
$\Delta x$	Espessura do alvo
$\sigma$	Secção eficaz total
$S_{elec}$	Poder de paragem electrónico
$S_{nuc}$	Poder de paragem nuclear
$S_N^{AB}$	Secção eficaz de paragem do composto AB
$k$	Factor cinemático
$M$	Massa da partícula
$v$	Velocidade da partícula
$E_{lab}$	Energia no referencial laboratório
$\frac{d\sigma_{Rut} h}{d\Omega_{lab}}$	Secção eficaz diferencial de Rutherford
$Z$	Número atómico da partícula
$e$	Carga elementar
$\theta_{lab}$	Ângulo de dispersão das partículas
$Y$	Rendimento
$N_\alpha$	Número de partículas $\alpha$ incidentes
$N$	Número de átomos por unidade de área
$\varepsilon_p$	Eficiência do detector
$r$	Razão estequiométrica
$\Gamma$	Resolução
$N_p$	Número de prótons incidentes

$\varepsilon_{abs}$	Eficiência absoluta do detector de radiação $\gamma$
$\frac{d\sigma}{d\Omega_{lab}}$	Secção eficaz diferencial da reacção nuclear
$\varepsilon_{\gamma}$	Eficiência intrínseca do detector de radiação $\gamma$
$q$	Estado de carga
$V$	Valor do potencial

## 1. Introdução

O sódio (Na) é um elemento químico que pertence ao grupo dos metais alcalinos. São conhecidos 18 isótopos deste elemento, o único estável é o  $^{23}\text{Na}$ . Existe no Sol, nas estrelas espalhadas pelo cosmos, está sempre presente na Biosfera. É um dos principais componentes da litosfera, da hidrosfera e dos aerossóis atmosféricos. É também um elemento essencial do metabolismo dos seres vivos.

O primeiro acelerador de partículas capaz de induzir uma reacção nuclear foi construído por John Cockcroft (1897-1967) e Ernest Walton (1903-1995) no Laboratório Cavendish do departamento de física da Universidade de Cambridge, no Reino Unido. Em 1932 estudaram a reacção nuclear  $^7\text{Li}(p,\alpha)^4\text{He}$ , bombardeando o lítio com protões de energia até 380 keV.

Actualmente existem aceleradores na iminência de acelerar partículas, electrões até 3,8 GeV e protões até 7 TeV.

Na Unidade de Física e Aceleradores, do Laboratório de Feixe de Iões, do Instituto Tecnológico e Nuclear (UFA-LFI/ITN) em Sacavém, Portugal, existem dois aceleradores de partículas. O acelerador Van de Graaff de 2,5 MV, com três linhas experimentais, disponibiliza técnicas de feixe de iões tais como Retrodispersão de Rutherford (RBS, do Inglês *Rutherford Backscattering Spectrometry*), Emissão de Raios-X Induzida por Protões (PIXE, do Inglês *Proton Induced X-ray Emission*), Análise de Reacções Nucleares (NRA, do Inglês *Nuclear Reactions Analysis*), Canalização Iónica (do Inglês *Ion Channeling*), Detecção por Recuo Elástico (ERD, do Inglês *Elastic Recoil Detection*). O acelerador Tandem de 3 MV, está equipado com uma linha de espectroscopia de massa (AMS, do Inglês *Accelerator Mass Spectrometry*) e com uma linha dedicada ao estudo de reacções nucleares, Emissão de Radiação Gama Induzida por Protões (PIGE, do Inglês *Proton Induced Gamma-ray Emission*) e ainda PIXE.

Este trabalho foi desenvolvido na UFA-LFI/ITN, em conjunto com o Grupo de Reacções Nucleares e Dinâmica de Poucos Corpos pertencente ao Centro de Física Nuclear da Universidade de Lisboa (CFNUL).

O objectivo principal deste trabalho é medir a secção eficaz total da reacção nuclear de dispersão inelástica de protões por  $^{23}\text{Na}$ :  $^{23}\text{Na}(p,p'\gamma)^{23}\text{Na}$ . Também foram estudadas as reacções nucleares de dispersão elástica  $^{19}\text{F}(\alpha,\alpha)^{19}\text{F}$ ,  $^{23}\text{Na}(\alpha,\alpha)^{23}\text{Na}$  e  $\text{Ag}(\alpha,\alpha)\text{Ag}$ .

A secção eficaz da reacção nuclear  $^{23}\text{Na}(p,p'\gamma)^{23}\text{Na}$  medida anteriormente por diferentes autores [1, 2] apresenta discrepâncias que se traduzem numa incerteza elevada desta grandeza para as energias de interesse, justificando assim uma nova medição.

O estudo da função de excitação da reacção  $^{23}\text{Na}(p,p'\gamma)^{23}\text{Na}$  é muito importante para a Física Nuclear, não só porque esta reacção de dispersão inelástica tem um papel fundamental na descrição do canal de entrada das reacções nucleares que envolvem protões e o isótopo  $^{23}\text{Na}$ , mas também porque

até há pouco tempo a função de excitação, e em particular, o valor das secções eficazes não eram bem conhecidos. O seu estudo dá-nos informação acerca dos potenciais de interacção e dos níveis excitados do núcleo composto.

O estudo das reacções nucleares deu origem a técnicas de feixes de iões (IBA, do Inglês *Ion Beam Analysis*) utilizadas para caracterizar materiais. Estas técnicas diferem entre si devido às diferentes interacções entre as partículas incidentes e os átomos do alvo.

A técnica de PIGE faz parte do conjunto de ferramentas que permitem o estudo da composição do mais variado tipo de amostras de um modo absoluto. É utilizada para caracterizar elementos leves.

No início da década de 60, Sippel et al. e Pierce et al. [3, 4] comprovaram experimentalmente que, através das emissões gama, podiam determinar a quantidade de magnésio (Mg), flúor (F), oxigénio (O), carbono (C) e silício (Si) existentes numa amostra. Na altura eram utilizados detectores de iodeto de sódio activado com tálio (NaI(Tl)) e, devido à sua baixa resolução, as experiências estavam limitadas à análise de um ou dois elementos.

Em 1988, Borderie, Boni et al. [4,5] realizaram o estudo de alvos finos. Mediram as secções eficazes diferenciais, das reacções nucleares:  ${}^7\text{Li}(p,p'\gamma){}^7\text{Li}$ ,  ${}^{10}\text{B}(p,\alpha\gamma){}^7\text{Be}$ ,  ${}^{19}\text{F}(p,p'\gamma){}^{19}\text{F}$ ,  ${}^{23}\text{Na}(p,p'\gamma){}^{23}\text{Na}$ ,  ${}^{24}\text{Mg}(p,p'\gamma){}^{24}\text{Mg}$ ,  ${}^{25}\text{Mg}(p,p'\gamma){}^{25}\text{Mg}$ ,  ${}^{27}\text{Al}(p,p'\gamma){}^{27}\text{Al}$ ,  ${}^{28}\text{Si}(p,p'\gamma){}^{28}\text{Si}$  e  ${}^{31}\text{P}(p,p'\gamma){}^{31}\text{P}$ , no intervalo de energias entre 2,2 e 3,8 MeV.

Actualmente a PIGE visa constituir a técnica de referência para análise de alguns elementos mais leves do que o Si que faz uma análise não destrutiva.

Esta técnica é utilizada nas mais variadas áreas: conservação e restauro, arqueologia, biologia, geologia, materiais, estudo de aerossóis [7].

Neste trabalho mede-se a secção eficaz total da transição correspondente à emissão de um fóton de 440 keV, da reacção nuclear  ${}^{23}\text{Na}(p,p'\gamma){}^{23}\text{Na}$ , para efeitos do desenvolvimento da técnica PIGE.

A determinação experimental da secção eficaz de uma reacção nuclear requer uma medição rigorosa da intensidade do feixe de partículas carregadas, o que implica conhecer o seu valor absoluto e também a sua reprodutibilidade.

Assim uma das finalidades deste trabalho é otimizar a linha de Reacções Nucleares/PIGE do acelerador Tandem. Para tal, foi dimensionado, construído, montado e testado nesta linha, um novo sistema visor/medidor de intensidade de feixe.

Nesta dissertação são apresentados os fundamentos teóricos que suportam as técnicas RBS e PIGE. É feita uma contextualização das experiências do mesmo tipo realizadas anteriormente. São explicados todos os equipamentos e métodos experimentais utilizados e desenvolvidos ao longo deste trabalho. Efectua-se a análise da reacção  ${}^{23}\text{Na}(p,p'\gamma){}^{23}\text{Na}$ , na risca de 440 keV. Finalmente são apresentadas as conclusões sobre o trabalho realizado.

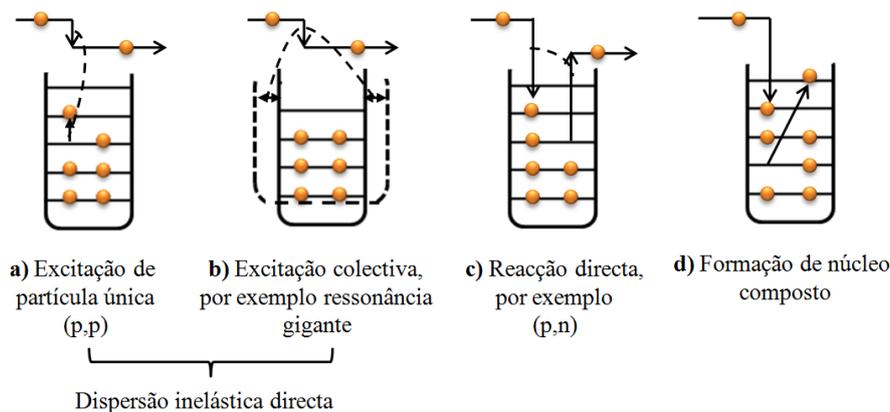
## 2. Fundamentos teóricos

Na introdução foram explicados os objectivos e a importância do estudo apresentado neste trabalho. Ao longo deste capítulo são descritos os conceitos teóricos essenciais para a compreensão da metodologia utilizada na medição experimental das secções eficazes da reacção  $^{23}\text{Na}(p,p'\gamma)^{23}\text{Na}$ .

### 2.1. Reacções nucleares

Consideremos um feixe de partículas direccionado contra uma porção de material (alvo). Quando um destes projecteis se aproxima a curta distância de um núcleo do alvo, fica sob influência do potencial criado por esse núcleo. Pode ocorrer dispersão elástica ou penetração do projectil no interior do núcleo que desencadeie uma reacção nuclear devido a interacções com os nucleões. Na dispersão elástica não há excitação de qualquer grau de liberdade interno dos parceiros intervenientes e a soma das energias cinéticas permanece constante. A dispersão de Rutherford é um exemplo de dispersão elástica, só sendo válido, no entanto, se for causada por um campo puramente coulombiano. Para distâncias muito pequenas entre os parceiros de colisão é necessário considerar igualmente a força nuclear na dispersão elástica.

Quando um projectil é absorvido para fora do canal elástico pode desencadear uma reacção nuclear através de uma série de diferentes mecanismos de interacções com os nucleões do núcleo conforme está representado esquematicamente na Figura 2.1.



**Figura 2.1:** Representação esquemática de diferentes processos de reacção [35].

### **2.1.1 Dispersão inelástica**

A partícula transmite parte da sua energia a um único nucleão e continua o seu percurso com uma energia menor (ver Figura 2.1 a). O núcleo original fica assim num estado excitado. O espectro de energia das partículas dispersas inelasticamente reflecte então os espectros de excitação do núcleo-alvo. A transferência de energia para o núcleo-alvo pode também ter lugar de modo a ser excitado um movimento colectivo, isto é, um estado vibracional ou rotacional. (ver Figura 2.1 b).

### **2.1.2 Reacções directas**

O projectil é capturado no poço de potencial transmitindo energia a uma outra partícula, que abandona o núcleo (ver Figura 2.1 c).

Tanto a dispersão inelástica como as reacções directas são consideradas processos de reacção "directos" com uma duração da ordem dos  $10^{-22}$  s, correspondente ao tempo de travessia do núcleo por um nucleão.

### **2.1.3 Reacções de núcleo composto**

Tanto o projectil como o nucleão que sofreu a colisão no processo de interacção primário permanecem no núcleo, numa interacção em que nenhum deles tem energia suficiente para abandonar o potencial (ver Figura 2.1 d). Assiste-se então à reorganização da estrutura nuclear até que um nucleão receba energia suficiente para abandonar o núcleo. Este processo é obviamente mais demorado (aproximadamente até  $10^{-16}$  s) do que um processo de reacção directo. Para energias maiores do projectil, também pode ocorrer uma reacção de núcleo composto em vez da emissão directa, caso o parceiro da reacção com energia suficiente para poder abandonar o núcleo colida com outro nucleão, emitindo uma segunda partícula. Se essa cadeia continuar, acaba por ocorrer uma distribuição de energia por muitos nucleões.

### **2.1.4 Ressonâncias**

O registo de uma secção eficaz para uma certa reacção em função da energia corresponde à função de excitação dessa reacção.

É no aparecimento das ressonâncias que se manifesta de forma mais vincada a dependência da secção eficaz na energia.

As regiões das ressonâncias são definidas como níveis discretos na região do núcleo composto.

As ressonâncias aparecem quando a energia disponível (no referencial centro de massa (CM)) coincide com um nível de energia do núcleo composto  $a + A$ , isto é, quando as suas larguras são muito pequenas devido à energia incidente ser baixa.

Estes níveis têm uma elevada probabilidade de formação (secções eficazes elevadas). O estado semi-ligado que é formado geralmente tem apenas dois modos de decaimento disponíveis: rejeitando a partícula incidente como numa dispersão elástica ou inelástica, ou por emissão  $\gamma$ .

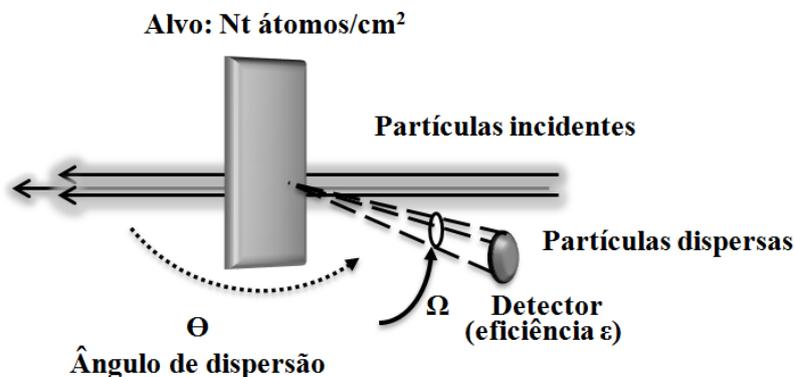
## 2.2. Secção eficaz

Para se compreender a metodologia utilizada pela técnica de PIGE é fundamental ter em conta alguns conceitos teóricos. O conceito de secção eficaz é o mais importante de todo o capítulo, pois é ele que nos permite obter os resultados pretendidos neste estudo.

As partículas carregadas, interagem continuamente, através da força de Coulomb, com os electrões do meio que atravessam e também com os núcleos dos átomos.

Os processos nos quais a energia e/ou direcção da radiação é alterada, são aleatórios pelo que só se pode falar em probabilidades de ocorrência das interacções. Estas probabilidades podem ser expressas em termos de secções eficazes.

Considere um detector que detecta partículas produzidas/dispersas num alvo e emitidas numa direcção  $(\theta, \phi)$  em relação à direcção do feixe incidente que atinge o alvo com uma intensidade  $I_a$  (partículas/s) (ver Figura 2.2).



**Figura 2.2:** Representação esquemática da geometria de colisões de partículas com o alvo.

Este detector define um pequeno ângulo sólido  $d\Omega$  em relação ao alvo.

Nesta situação a secção eficaz,  $\sigma$ , é definida pela equação:

$$d\sigma = \frac{dR_b}{I_a N t} \quad (2.1)$$

onde  $R$  é a taxa de produção das partículas (partículas de saída).

A secção eficaz é uma grandeza com dimensões de área, proporcional à probabilidade de ocorrer a interacção.

O detector ocupa apenas uma pequena fracção do ângulo sólido total ( $= 4\pi$ ), logo não consegue observar todas as partículas emitidas. Apenas uma pequena fracção é realmente contada e, portanto, só uma pequena fracção da secção eficaz  $d\sigma$  será deduzida.

Como as partículas produzidas na interacção não são geralmente emitidas isotropicamente, apresentam uma distribuição angular, que depende de  $\theta$  e possivelmente de  $\phi$ :

$$dR = r(\theta, \phi) \frac{d\Omega}{4\pi} \quad (2.2)$$

onde  $r(\theta, \phi)$  é a distribuição angular de emissão das partículas.

A secção eficaz diferencial  $\frac{d\sigma}{d\Omega}$  é, então, dada por:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{r(\theta, \phi)}{4\pi I_a N t} \quad (2.3)$$

enquanto que a secção eficaz total  $\sigma$  pode ser determinada integrando  $\frac{d\sigma}{d\Omega}$  sobre todos os ângulos.

Desta forma:

$$\sigma = \int_{4\pi} \frac{d\sigma}{d\Omega} d\Omega = \int_0^\pi \int_0^{2\pi} \frac{d\sigma}{d\Omega} d\phi \sin(\theta) d\theta \quad (2.4)$$

Sabe-se que um elemento de área na superfície de uma esfera de raio  $R$  é, em coordenadas esféricas dada pela expressão:

$$dS = R^2 d\Omega = R^2 \sin \theta d\theta d\phi \quad (2.5)$$

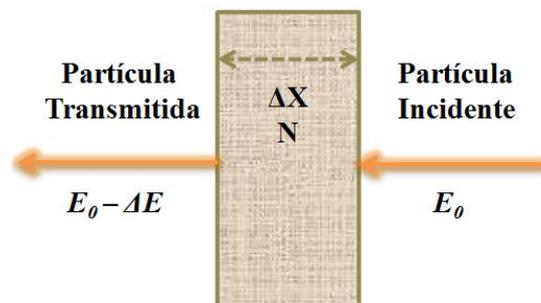
logo,

$$d\Omega = \sin \theta d\theta d\phi \quad (2.6)$$

### 2.3. Poder de paragem

Outro conceito teórico a ter em conta neste estudo é o conceito de poder de paragem.

A perda de energia que as partículas incidentes sofrem ao longo do caminho, quando atravessam o alvo, é devida à sua interacção com os átomos do alvo (ver Figura 2.3).



**Figura 2.3:** Diagrama esquemático da transmissão por um alvo fino.  $\Delta E$  é a energia perdida e  $\Delta x$  a espessura do alvo correspondente à densidade superficial  $N$ .

Esta interacção pode ser coulombiana da partícula incidente com os electrões ligados ou livres (poder de paragem electrónico,  $S_{elec}$ ), ou pode ser uma interacção com os núcleos dos átomos do alvo (poder de paragem nuclear,  $S_{nuc}$ ):

$$S = S_{elec} + S_{nuc} \quad (2.7)$$

O poder de paragem é dado pelo quociente:

$$S = \frac{dE}{dx} \quad (2.8)$$

onde  $dE$  é a quantidade de energia perdida por unidade de comprimento,  $dx$ , do material atravessado.

O cálculo do poder de paragem implica o conhecimento da densidade do material, o qual não se conhece com exactidão em muitas das aplicações em Física Nuclear. Deste modo, é introduzida uma nova grandeza a secção eficaz de paragem, definida pela expressão:

$$S_N(E) = \frac{S}{N} \quad (2.9)$$

onde  $N$  é a densidade do meio expressa em  $\text{at}/\text{cm}^3$  ou  $\text{g}/\text{cm}^3$ . Assim, a secção eficaz de paragem apresenta unidades de energia por densidade superficial (exemplo:  $\text{eV}/10^{15}\text{at}/\text{cm}^2$ ,  $\text{eVcm}^2$ ,  $\text{eVcm}^2\text{g}^{-1}$ ).

Através da Lei de Bragg obtém-se a perda de energia associada a compostos. Segundo esta lei, se o composto apresentar dois elementos  $A$  e  $B$  com a proporção dada por  $A_m B_n$ , a secção eficaz de paragem do composto  $S_N^{AB}$  é dada pela média pesada das secções eficazes de paragem parciais  $S_N^A$  e  $S_N^B$ , ou seja:

$$S_N^{AB} = mS_N^A + nS_N^B \quad (2.10)$$

onde  $m$  e  $n$  podem representar as fracções mássicas ou os índices estequiométricos de cada componente, consoante o que é pretendido.

#### 2.4. Retrodispersão de Rutherford

Neste trabalho foram colectados espectros de RBS com partículas  $\alpha$ , através dos quais se determinaram a espessura e estequiometria do alvo utilizado nesta experiência [alvo finocomposto por

um filme de fluoreto de sódio (NaF) depositado sobre um filme auto-sustentado de prata (Ag), ou seja, NaF/Ag, o procedimento de concepção do alvo é explicado no capítulo 4].

Este método de análise é baseado na detecção de partículas carregadas dispersas elasticamente pelos núcleos do alvo.

A técnica de RBS tem por base três conceitos fundamentais: o factor cinemático, o poder de paragem e a secção eficaz de Rutherford.

Para calcular o factor cinemático,  $k$ , considera-se a transferência de energia da partícula incidente para o átomo do alvo, que pode ser calculada aplicando as leis da conservação do momento linear e da energia cinética, traduzidas pelas seguintes expressões:

$$M_1 v = M_1 v_1 \cos \theta_{lab} + M_2 v_2 \cos \delta_{lab} \quad (2.11)$$

$$0 = M_1 v_1 \sin \theta_{lab} - M_2 v_2 \sin \delta_{lab}$$

$$\frac{1}{2} M_1 v^2 = \frac{1}{2} M_1 v_1^2 + \frac{1}{2} M_2 v_2^2 \quad (2.12)$$

onde  $M_1$  e  $M_2$  são as massas da partícula incidente (projectil) e do núcleo alvo;  $v$ ,  $v_1$  e  $v_2$  são as velocidades da partícula incidente, retrodispersa e de recuo do núcleo do alvo;  $\theta_{lab}$  e  $\delta_{lab}$  são os ângulos do projectil disperso e do núcleo alvo que recua.

O factor cinemático é dado pela razão entre a energia da partícula incidente após a colisão,  $E_1$ , e a energia inicial,  $E_{lab}$ :

$$k = \frac{E_1}{E_{lab}} \Rightarrow k = \left[ \frac{\sqrt{M_2^2 - M_1^2 \sin^2 \theta_{lab}} + M_1 \cos \theta_{lab}}{M_1 + M_2} \right]^2 \quad (2.13)$$

Através da expressão 2.13 calcula-se a energia da partícula incidente após a colisão:

$$E_1 = k E_{lab} \quad (2.14)$$

A partir do factor cinemático conseguem-se identificar as massas dos elementos presentes no espectro de RBS.

Para uma determinada energia incidente, a probabilidade das partículas incidentes serem dispersas segundo um certo ângulo,   dada pela secção diferencial de Rutherford (dispersão elástica coulombiana):

$$\frac{d\sigma_{Ruth}(E_{lab}, \theta_{lab})}{d\Omega_{lab}} = \left(\frac{Z_1 Z_2 e^2}{4E}\right)^2 \frac{4(\cos \theta_{lab} + \sqrt{1 - (M_1/M_2)^2 \sin^2 \theta_{lab}})}{\sin^4 \theta_{lab} \sqrt{1 - (M_1/M_2)^2 \sin^2 \theta_{lab}}} \quad (2.15)$$

onde os termos  $Z_1$ ,  $Z_2$ , representam, respectivamente, os números at micos do projectil e do alvo,  $e$  representa a carga elementar e  $E_{lab}$  a energia do projectil.

Usa-se RBS com partículas  $\alpha$  para obter as densidades superficiais (at/cm<sup>2</sup>) de Ag, Na e F, recorrendo aos valores, medidos directamente dos espectros de RBS, dos rendimentos de F, Na e Ag,  $Y_F(\theta_{lab})$ ,  $Y_{Na}(\theta_{lab})$ ,  $Y_{Ag}(\theta_{lab})$ , respectivamente:

$$Y_F(\theta_{lab}) = N_\alpha N_F \left[ \frac{d\sigma_{Ruth}^F(E_{lab}, \theta_{lab})}{d\Omega_{lab}} \right] \Omega_{lab} \varepsilon_p \quad (2.16)$$

$$Y_{Na}(\theta_{lab}) = N_\alpha N_{Na} \left[ \frac{d\sigma_{Ruth}^{Na}(E_{lab}, \theta_{lab})}{d\Omega_{lab}} \right] \Omega_{lab} \varepsilon_p \quad (2.17)$$

$$Y_{Ag}(\theta_{lab}) = N_\alpha N_{Ag} \left[ \frac{d\sigma_{Ruth}^{Ag}(E_{lab} - \Delta E_\alpha, \theta_{lab})}{d\Omega_{lab}} \right] \Omega_{lab} \varepsilon_p \quad (2.18)$$

onde  $N_\alpha$    o número de partículas  $\alpha$  incidentes,  $N_F$ ,  $N_{Na}$  e  $N_{Ag}$  são, respectivamente, o número de átomos por unidade de área de F, Na e Ag,  $\Omega_{lab}$    o ângulo sólido do detector,  $\varepsilon_p$  a sua eficiência e  $\Delta E_\alpha$  corresponde   energia perdida pelas partículas  $\alpha$  ao atravessar o fluoreto de sódio antes de atingir a prata.

Fazendo os quocientes entre as expressões 2.17 e 2.16 e entre 2.17 e 2.18,   possível calcular a razão estequiométrica entre o Na e o F,

$$\frac{N_{Na}}{N_F} = \frac{Y_{Na}(E_{lab}, \theta_{lab})}{Y_F(E_{lab}, \theta_{lab})} \frac{\frac{d\sigma_{Ruth}^F(E_{lab}, \theta_{lab})}{d\Omega_{lab}}}{\frac{d\sigma_{Ruth}^{Na}(E_{lab}, \theta_{lab})}{d\Omega_{lab}}} \quad (2.19)$$

e a razão entre o Na e a Ag,

$$\frac{N_{Na}}{N_{Ag}} = \frac{Y_{Na}(E_{lab}, \theta_{lab})}{Y_{Ag}(E_{lab}, \theta_{lab})} \frac{\frac{d\sigma_{Rut}^{Ag}}{d\Omega_{lab}}(E_{lab}, \theta_{lab})}{\frac{d\sigma_{Rut}^{Na}}{d\Omega_{lab}}(E_{lab}, \theta_{lab})} \quad (2.20)$$

Como se explicará mais adiante neste trabalho, esta última razão servirá para eliminar a incerteza associada à medição do valor absoluto da carga acumulada no registo da função de excitação da dispersão inelástica  $^{23}\text{Na}(p,p'\gamma)^{23}\text{Na}$ .

Da primeira razão estequiométrica calcula-se com exactidão o valor de  $N_{Na}$ , que é necessário no cálculo da função de excitação acima mencionada.

## 2.5. Emissão de radiação gama induzida por protões

A técnica de PIGE é um caso particular da NRA.

As técnicas de PIGE e PIXE são complementares entre si. A instrumentação e o formalismo utilizados nas duas técnicas são bastante similares. Para elementos mais leves que o Si, os raios-X detectáveis são sempre inferiores a 2 keV. A única via para a detecção rigorosa dos elementos leves é através da análise espectral de radiação gama.

Como referido anteriormente a técnica de PIGE tem por base dois conceitos fundamentais: a secção eficaz e o poder de paragem.

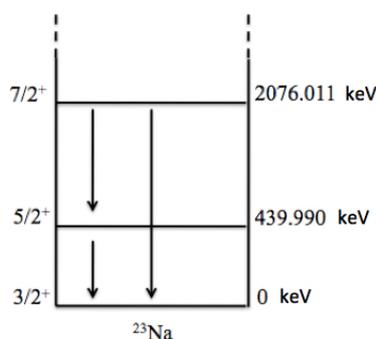
Quando bombardearmos amostras contendo elementos mais leves que o Si, com um feixe de protões induzimos facilmente a emissão de radiação gama proveniente de reacções nucleares com os seus isótopos.

Desta forma, obtêm-se os espectros de radiação gama, que nos permitem analisar a presença destes elementos.

Na análise de um espectro de radiação gama, é possível tirar partido de qualquer reacção que envolva a emissão de fotões gama. Neste trabalho estuda-se a emissão de fotões de 440 keV provenientes da reacção  $^{23}\text{Na}(p,p'\gamma)^{23}\text{Na}$ .

Através do diagrama de desexcitação do produto pesado da reacção estabelece-se qual é a energia do fóton gama emitido. Esta informação pode ser obtida a partir dos esquemas de níveis de excitação dos isótopos.

Na Figura 2.5 está representado o diagrama dos primeiros níveis de excitação do isótopo  $^{23}\text{Na}$ .



**Figura 2.4:** Diagrama dos primeiros níveis de excitação do isótopo  $^{23}\text{Na}$  [8].

Nesta experiência a amostra utilizada é fina (com espessura da ordem  $\mu\text{m}$ ), e apesar da perda de energia dos iões incidentes pelo seu interior ser mínima ela é contabilizada ( $\approx 40 \text{ KeV}$ ).

As reacções nucleares são desencadeadas por partículas incidentes de energia bem definida. A partir do cálculo das secções eficazes  possível quantificar os elementos que compõem o alvo.

### 2.5.1. Metodologia utilizada na determinação experimental da secção eficaz

Para determinar experimentalmente a secção eficaz da risca de 440 keV, da reacção nuclear  $^{23}\text{Na}(p,p'\gamma)^{23}\text{Na}$ , foram colectados, simultaneamente, espectros gama e espectros de partículas carregadas.

Neste caso o rendimento da radiação gama para a emissão do  $\gamma = 440 \text{ keV}$  do Na,  $Y_\gamma^{Na}(E_{lab}, \theta_{lab})$ , induzido pelo feixe de protões é dado por:

$$Y_\gamma^{Na}(E_{lab}, \theta_{lab}) = N_p N_{Na} \frac{d\sigma(E_{lab}, \theta_{lab})}{d\Omega_{lab}} \varepsilon_{abs} \quad (2.21)$$

onde  $N_p$  é o número de protões incidentes,  $\frac{d\sigma(E_{lab}, \theta_{lab})}{d\Omega_{lab}}$  a secção eficaz diferencial da reacção nuclear  $^{23}\text{Na}(p,p'\gamma)^{23}\text{Na}$  e  $\varepsilon_{abs}$  a eficiência absoluta do detector de radiação gama para a radiação de

440 keV. Esta reacção nuclear depende da energia incidente do feixe de protões  $E_{lab}$  e do ângulo do detector de radiação gama  $\theta_{lab}$ .

A eficiência absoluta do detector de radiação gama é definida por:

$$\varepsilon_{abs}(E_\gamma) = \Omega_\gamma \varepsilon_\gamma \quad (2.22)$$

onde  $\Omega_\gamma$  é o ângulo sólido do detector de radiação gama,  $\varepsilon_\gamma$  a eficiência intrínseca do detector de radiação gama.

Os espectros de partículas carregadas permitem calcular com exactidão o valor  $N_p$  utilizando um raciocínio idêntico ao exposto na secção 2.4. Este valor é obtido através da expressão do rendimento da Ag:

$$Y_p^{Ag}(E_{lab}, \theta_{lab}) = N_p N_{Ag} \frac{d\sigma_{Rut}^{Ag}(E_{lab}, -\Delta E_p, \theta_{lab})}{d\Omega_{lab}} \varepsilon_{int} \Omega_p \Leftrightarrow \quad (2.23)$$

$$\Leftrightarrow N_p = \frac{Y_p^{Ag}(E_{lab}, \theta_{lab})}{N_{Ag} \frac{d\sigma_{Rut}^{Ag}(E_{lab}, -\Delta E_p, \theta_{lab})}{d\Omega_{lab}} \varepsilon_{int} \Omega_p}$$

onde  $\Omega_p$  é o ângulo sólido do detector de partículas carregadas,  $\varepsilon_{int}$  a eficiência intrínseca do detector de partículas carregadas e  $\Delta E_p$  é a perda de energia dos protões na camada de fluoreto de sódio antes de atingir o filme de prata.

A escolha da prata para este cálculo deve-se ao facto desta ser um elemento pesado, e para a gama de energias analisadas, a dispersão elástica dos protões pela Ag ser coulombiana e, portanto, a sua secção eficaz ser a secção eficaz de Rutherford.

Com duas energias incidentes diferentes, onde o pico de Ag está bem definido sem sobreposição de picos correspondentes a partículas  $\alpha$  provenientes das reacções nucleares  $^{19}\text{F}(p,\alpha)^{16}\text{O}$  e  $^{23}\text{Na}(p,\alpha)^{20}\text{Ne}$ , determina-se o valor de  $N_p$  pela expressão 2.23 e compara-se com o valor registado no integrador de corrente, obtendo-se para ambas as energias:

$$\frac{N_p^{Integrador}}{N_p^{corrente}} = \frac{N_p^{Pico\ de\ Ag}}{N_p} \quad (2.24)$$

Este factor correcção é aplicado à expressão 2.21.

Convém salientar que no início desta tomada de dados foram feitos testes de carga concluindo-se que o valor de carga medido é independente da energia e da intensidade do feixe, ou seja, a medida de carga é reprodutível.

Desta forma garante-se que o calculo das secções eficazes é feito sem dependência do  $N_p$ .

Outra maneira de analisar esta questão é dividir a expressão 2.21 pela expressão 2.23. Resolvendo esta nova expressão em ordem à secção eficaz diferencial da reacção nuclear obtém:

$$\frac{d\sigma(E_{lab}, \theta_{lab})}{d\Omega_{lab}} = \frac{Y_{\gamma}^{Na} \frac{d\sigma_{Ruth}^{Ag}(E_{lab}, -\Delta E_p, \theta_{lab})}{d\Omega_{lab}} \varepsilon_{int} \Omega_p}{r Y_p^{Ag}(E_{lab}, \theta_{lab}) \varepsilon_{abs}} \quad (2.21)$$

onde  $r$  a razão estequiométrica entre o Na e Ag.

Desta forma corrige-se a medida de carga.

Assim a secção eficaz diferencial é dependente apenas da razão estequiométrica de Na por Ag, ou seja, garante-se que o calculo das secções eficazes é feito sem dependência do número de protões incidentes. Desta forma a secção eficaz determinada não é dependente da medida de carga nem da espessura do alvo.

A perda de energia dos protões que atravessam o alvo de fluoreto de sódio é dada por:

$$\Delta E_p = \Delta E_{\alpha} \frac{S_{Np}(E_{lab}, \theta_{lab})}{S_{N\alpha}(E_{lab}, \theta_{lab})} \quad (2.25)$$

Na experiência os valores do  $S_{Np}$  e do  $S_{N\alpha}$  são determinados através do programa SRIM [11].

### 3. A reacção $^{23}\text{Na}(p,p'\gamma)^{23}\text{Na}$

Neste capítulo é apresentada a informação disponível na literatura, sobre a reacção nuclear  $^{23}\text{Na}(p,p'\gamma)^{23}\text{Na}$ .

Esta abordagem centra-se principalmente em dois estudos realizados por Mateus et al. [1] e por Caciolli et al. [2].

No estudo realizado por Mateus et al. [1], foi utilizado um alvo com um filme de cloreto de sódio (NaCl) evaporado sobre um filme de Ag auto-sustentada, com uma espessura de  $\Gamma = 14,4 \mu\text{g}/\text{cm}^2$  e um detector de germânio hiperpuro, Ge(HP), com  $\theta_{\text{lab}} = 120^\circ$ . Desta forma foi medida a secção eficaz da reacção  $^{23}\text{Na}(p,p'\gamma)^{23}\text{Na}$ , no intervalo de energias de 1250 a 2400 keV. Este estudo foi efectuado no acelerador Van de Graaff de 2,5 MV da UFA-LFI/ITN.

Na Tabela seguinte é apresentada a comparação das medidas de energia das ressonâncias da reacção  $^{23}\text{Na}(p,p'\gamma)^{23}\text{Na}$  e da publicação dos estados excitados do nuclido  $^{24}\text{Mg}$  [1].

**Tabela 3.1:** Energia das ressonâncias (em keV) da reacção  $^{23}\text{Na}(p,p'\gamma)^{23}\text{Na}$  medidas por Mateus et al. [1] e comparadas com as disponíveis na literatura, na altura da publicação dos estados excitados do nuclido  $^{24}\text{Mg}$  [1].

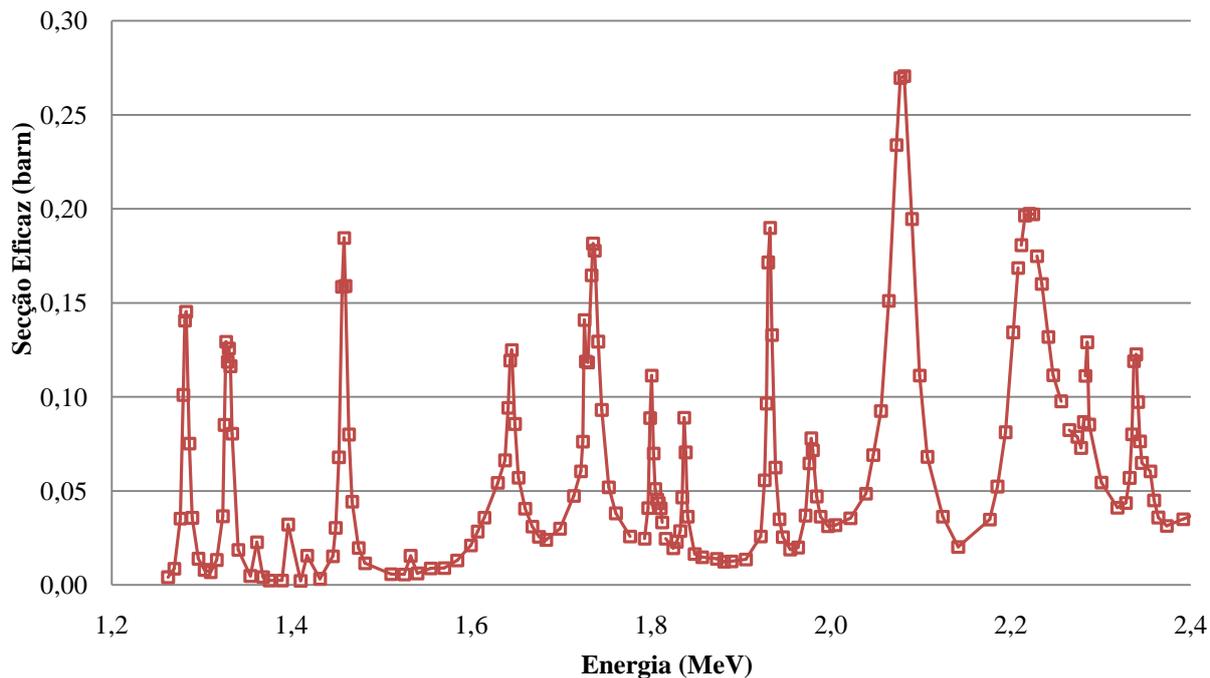
Medidas	Publicadas	Medidas	Publicadas	Medidas	Publicadas
$2339 \pm 2$	2339.0	$1978 \pm 1$	$1977.5 \pm 1.0$		
$2285 \pm 2$	2284.9	$1932 \pm 1$	$1930.7 \pm 0.8$	$1645 \pm 1$	$1645.1 \pm 0.7$
$2220 \pm 2$	2219.7	$1836 \pm 1$	$1837.5 \pm 0.8$	$1458 \pm 1$	$1457.3 \pm 0.3$
$2081 \pm 1$	2076.6		$1807.9 \pm 1.2$	$1330 \pm 1$	$1331.2 \pm 0.4$
		$1800 \pm 1$	$1802.3 \pm 0.8$		$1327.1 \pm 0.4$
		$1735 \pm 1$	$1735.2 \pm 0.8$	$1283 \pm 1$	1283
			1732		$1282.8 \pm 0.4$
		$1726 \pm 1$	$1725.5 \pm 0.6$		

Pela observação da Tabela 3.1 verifica-se que os valores de Mateus et al. [1] são concordantes com os valores publicados pelos outros autores.

Esta reacção apresenta uma distribuição angular isotrópica para a emissão de 440 keV.

Na Figura 3.1 está representada a secção eficaz absoluta obtida por Mateus et al. [1], onde se verifica a existência de várias ressonâncias ao longo do intervalo de energias estudado por este autor.

**Função de Excitação  $^{23}\text{Na}(p,p'\gamma)^{23}\text{Na}$ ,  $\gamma=440\text{keV}$**



**Figura 3.1:** Secção eficaz de 440 keV, medida por Mateus et al. [1], da reacção  $^{23}\text{Na}(p,p'\gamma)^{23}\text{Na}$  no intervalo de energias  $E_{\text{lab}}=1100$  e  $2400$  keV.

Como se pode ver na Figura 3.2 as energias das ressonâncias estão de acordo com os valores publicados dos níveis excitados do núcleo composto  $^{24}\text{Mg}$  formado pela reacção  $^{23}\text{Na}(p,p'\gamma)^{23}\text{Na}$ .

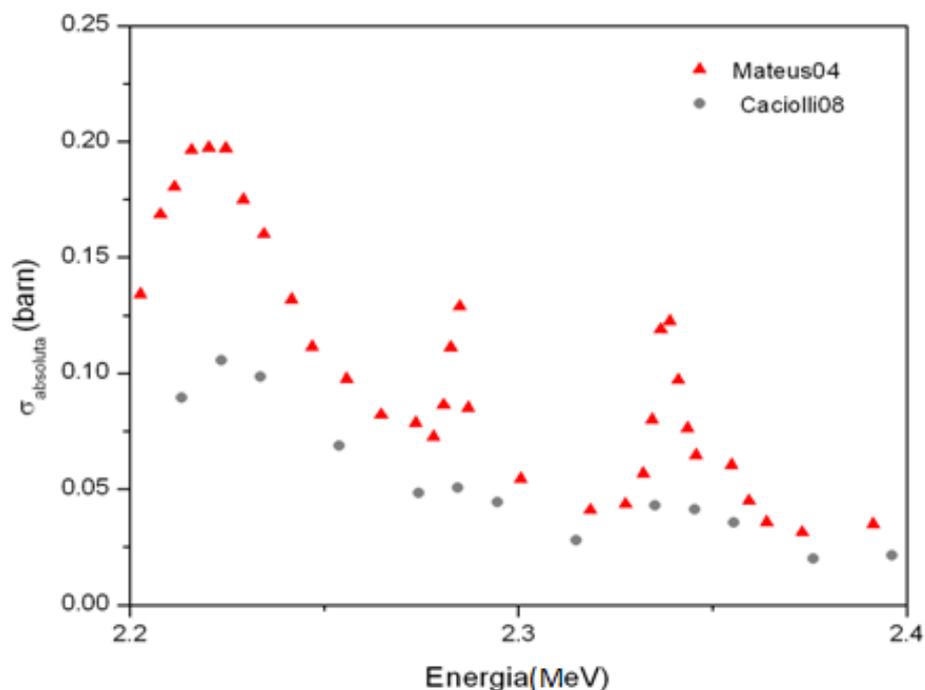
	13.933		3 <sup>+</sup>	13.344	
1 <sup>+</sup>	13.879			13.267	
2 <sup>-</sup>	13.820		3 <sup>-</sup>	13.087	
2 <sup>-</sup>	13.682			12.966	
	13.585		2 <sup>-</sup>	12.962	
1 <sup>-</sup>	13.540		3 <sup>-</sup>	12.920	
	13.451				
2 <sup>+</sup>	13.417				11.691
2 <sup>-</sup>	13.353				$^{23}\text{Na}+p$
					$^{24}\text{Mg}$

**Figura 3.2:** O diagrama dos estados excitados do núcleo composto,  $^{24}\text{Mg}$  [1].

No caso do estudo de Caciolli et al. [2] foi medida a secção eficaz diferencial com uma energia do feixe incidente superior a 2400 keV, com passos de energia de 20 keV, superiores aos utilizados por Mateus et al. [1].

Neste estudo foi utilizado um alvo com um filme composto por brometo de sódio NaBr evaporado sobre um filme de C auto-sustentado, com uma espessura de  $\Gamma = 63 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ , isto é, com  $\rho = 3,21 \text{ g}/\text{cm}^3 \Rightarrow 196 \text{ nm}$ , 3 vezes mais espesso que o alvo utilizado por Mateus et al. [1]. O detector de radiação gama foi colocado a  $135^\circ$  no referencial de laboratório.

Na Figura 3.3 está representada a comparação das secções eficazes obtidas por Mateus et al. [1] e por Caciolli et al. [2], no intervalo de energias onde há sobreposição de valores, assumindo que a distribuição angular é isotrópica. A secção eficaz diferencial de Caciolli et al. [2] foi multiplicada por um factor de  $4\pi$ .



**Figura 3.3:** Comparação das secções eficazes determinadas por Mateus et al [1] e por Caciolli et al. [2] da reacção  $^{23}\text{Na}(p, p'\gamma)^{23}\text{Na}$ , no intervalo de energias  $E_{\text{lab}} = 2200\text{-}2400 \text{ keV}$  [8].

Ao comparar os dois estudos verifica-se que no caso de Mateus et al. [1] as ressonâncias estão bem definidas, com passos de energia mais pequenos que os de Caciolli et al. [2]. Além disso a curva de Mateus et al. [1] apresenta-se sistematicamente acima da curva de Caciolli et al. [2]. Uma vez que esta discrepância não é constante ao longo da energia, a secção eficaz terá que ser novamente medida, para se entender a origem do problema nas medições efectuadas por Caciolli et al. [2]. Que poderá ser

motivado por erros no cálculo da estequiometria do alvo, por uma má medição da carga acumulada, por um ajuste errado da eficiência do detector, ou devido à espessura do alvo ser demasiado elevada e não satisfazer o pressuposto de "alvo fino".

## 4. Equipamento, montagem e procedimento experimental

Neste capítulo são descritas as condições e o procedimento experimental utilizados nas medidas das secções eficazes da reacção  $^{23}\text{Na}(p,p'\gamma)^{23}\text{Na}$ .

Este capítulo está dividido em duas secções. A primeira descreve o acelerador e instalação do novo sistema visor/medidor de intensidade de feixe. A segunda descreve a preparação e elaboração do alvo fino e a metodologia utilizada na experiência.

### 4.1 Acelerador Tandem

Um acelerador de partículas tem como finalidade criar e direccionar um feixe de um tipo específico de partículas (prótons, alfas, etc.) com uma determinada energia, contra um alvo.

Um acelerador exige uma fonte de partículas carregadas, um campo eléctrico para acelerar as partículas, magnetos analisadores para fazerem a selecção em  $q/m$  (carga/massa), elementos de focagem para contrariar a tendência natural do feixe para divergir e deflectores magnéticos (magnetos deflectores) ou eléctricos para alinhar o feixe na direcção desejada.

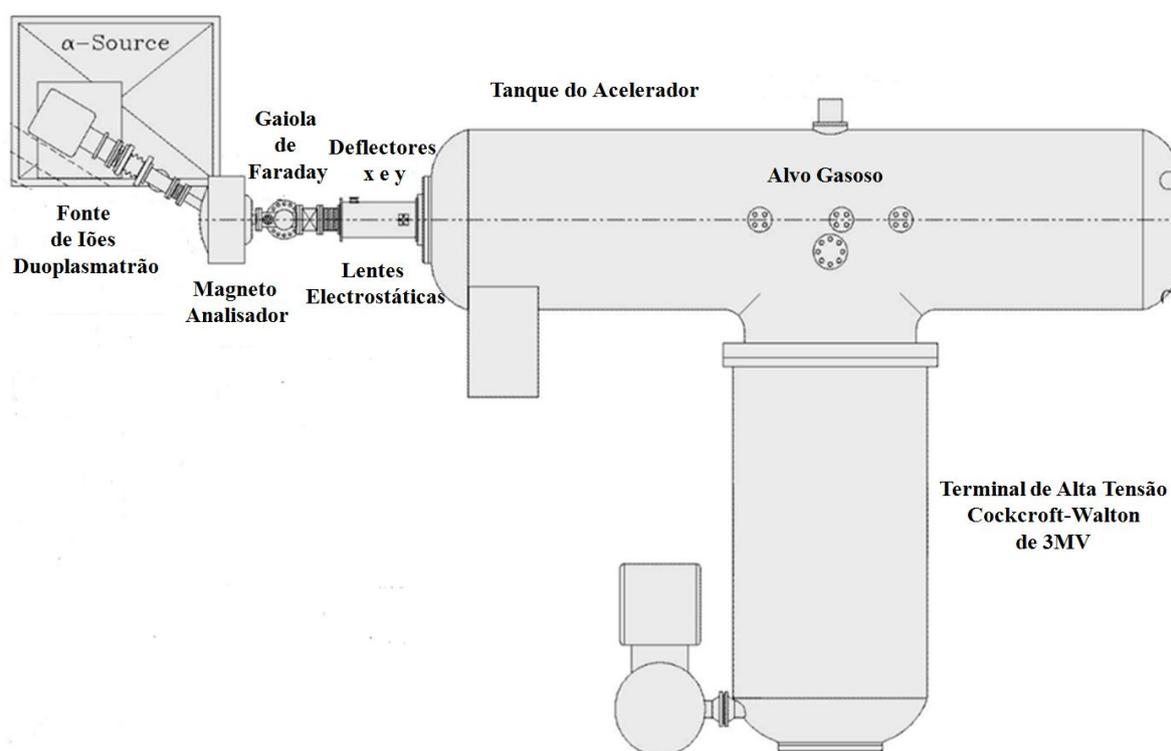


**Figura 4.1:** Acelerador Tandem de 3 MV da UFA-LFI/ITN.

#### 4.1.1 Princípio de funcionamento do acelerador Tandem

O acelerador Tandem da UFA-LFI/ITN é um acelerador electrostático de 3 MV. Está equipado com uma linha de AMS, uma linha dedicada ao estudo de reacções nucleares PIGE e por fim uma linha de PIXE.

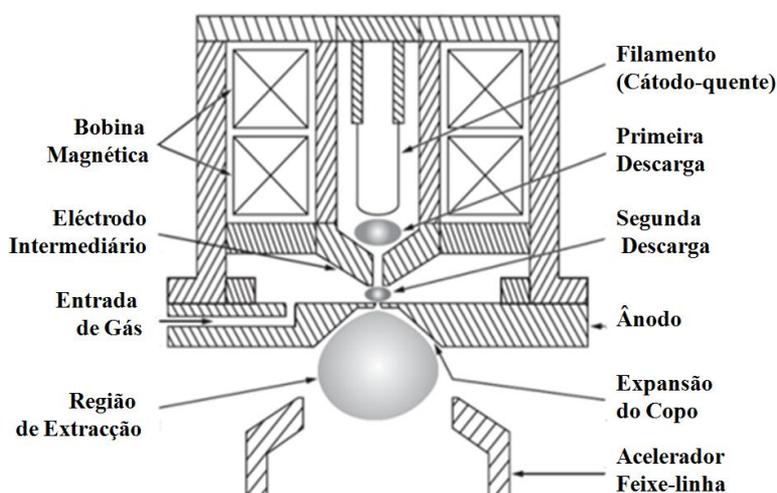
Neste trabalho é descrito o funcionamento do acelerador Tandem desde a fonte de iões até à câmara de Reacções Nucleares (aproximadamente 20 m). Para tal consideram-se 2 etapas. A primeira etapa, chamada de baixa energia é constituída pela fonte de iões, pelos tubos de aceleração, por um magneto analisador, por lentes electrostáticas e pelo acelerador, como se ilustra na Figura 4.2.



**Figura 4.2:** Esquema do acelerador Tandem de 3 MV da UFA-LFI/ITN (Etapa de baixa energia).

A fonte Duoplasmatrão é uma fonte de iões de hidrogénio, negativos, permitindo intensidades que podem atingir os 30  $\mu\text{A}$ . Neste tipo de fonte, de cátodo quente, é criado um plasma através de uma descarga de arco entre um cátodo termoiónico e um ânodo a uma tensão de algumas centenas de Volts. Junto do ânodo, existe um eléctrodo intermédio de forma cónica que comprime o plasma do lado do ânodo num pequeno volume, formando uma espécie de bolha de plasma. A bolha de plasma foca os electrões vindos da região do cátodo, criando uma elevada densidade de electrões e iões negativos

situada entre o eléctrodo intermédio e o cátodo. Os iões são então removidos por um potencial de extracção, através de um pequeno buraco existente no ânodo (ver Figura 4.3).



**Figura 4.3:** Esquema da fonte de iões Duoplasmatrão 358 [12].

O feixe produzido na fonte Duoplasmatrão está confinado ao interior dos tubos de aceleração onde é acelerado, deflectido e focado. A pressão no seu interior, da ordem dos  $10^{-6}$  mbar, é mantida por um sistema de bombas de vácuo, essencialmente bombas rotatórias e turbomoleculares. Esta pressão é mais que suficiente para evitar a perda de energia e a dispersão por colisões do feixe ao longo do percurso desde a fonte de iões até à câmara de reacções nucleares onde se pretende medir a reacção  $^{23}\text{Na}(p,p'\gamma)^{23}\text{Na}$ .

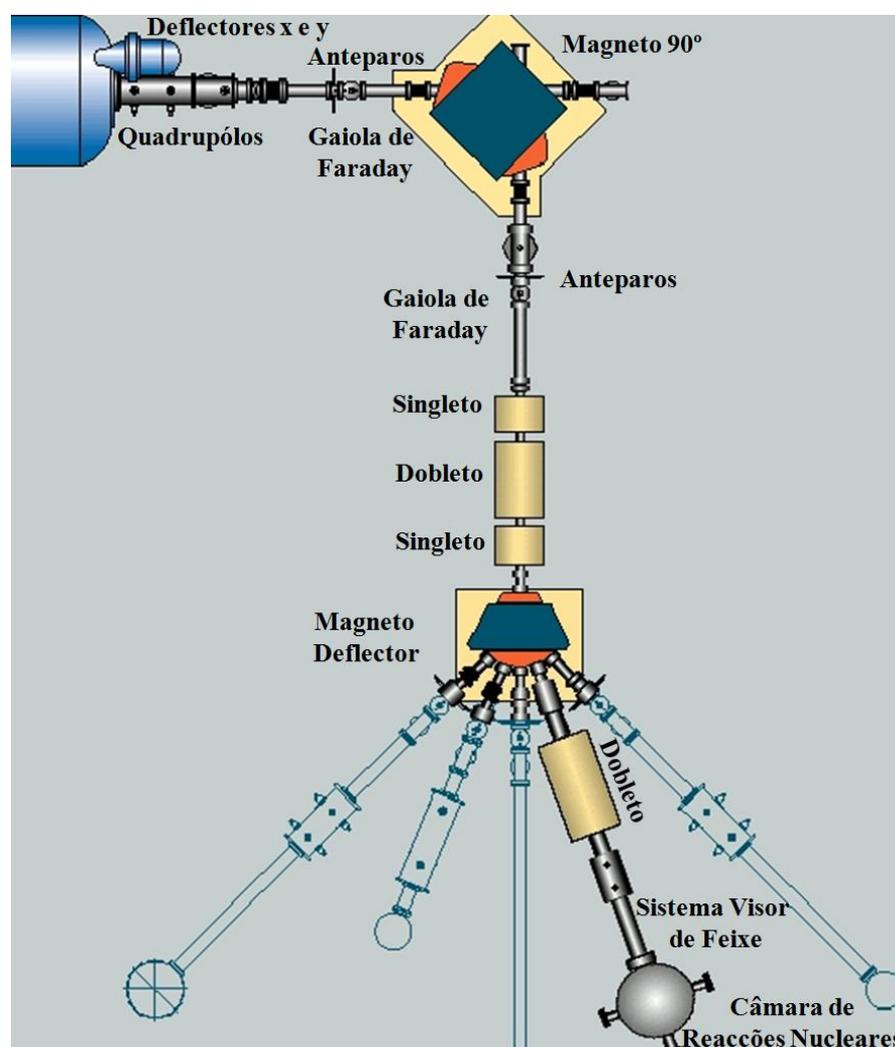
O tanque do acelerador está pressurizado com o gás  $\text{SF}_6$  a uma pressão de 6 bar, a qual permite criar um campo eléctrico muito intenso sem que ocorra disrupção eléctrica no interior do tanque. Este campo eléctrico responsável pela aceleração do feixe produzido na fonte Duoplasmatrão é conduzido até à fonte de alta tensão Cockcroft-Walton de 3 MV.

O terminal de alta tensão cria um potencial eléctrico positivo elevado (normalmente com valores entre 500 e 2500 kV) a meio do tanque do acelerador onde se encontra o *stripper* que não é mais do que um tubo com árgon a uma pressão regulável que pode atingir vários milibares. Os iões negativos são atraídos por este potencial positivo, na zona do *stripper* perdem os electrões por colisões com o gás transformando-se em iões positivos sofrendo uma nova aceleração devido ao mesmo potencial positivo, exercendo agora um efeito repulsivo. De salientar que este mecanismo de troca de carga no *stripper* apresenta rendimentos muito variáveis, não ultrapassando em geral os 30%.

A energia total ganha pelos iões que sobrevivem à travessia do *stripper* com uma estado de carga  $q$  é  $(1 + q)V$ , onde  $V$  é o valor do potencial positivo criado no centro do acelerador.

A segunda etapa, chamada de alta energia é igualmente composta, entre outros, por uma sucessão de elementos de óptica electromagnética.

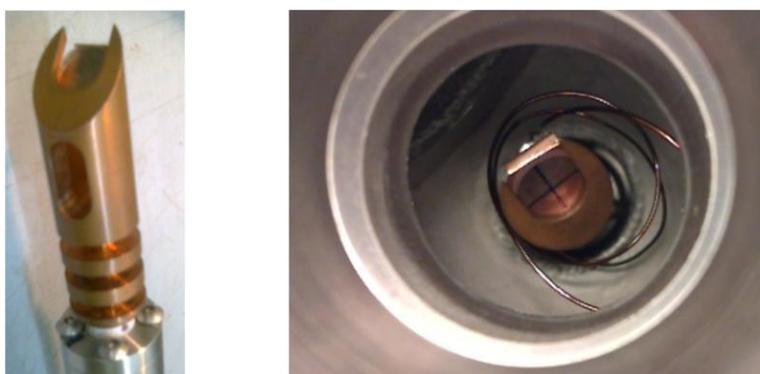
Os elementos de óptica electromagnética existentes entre a saída do tanque do acelerador e a câmara de reacções nucleares consistem em dois magnetos (um analisador e o outro deflector), seis quadrupolos (tripleto e dobleto) para focar o feixe e dois pares de deflectores electrostáticos para orientar o feixe de modo a entrar correctamente na câmara de reacções nucleares, como se pode ver na Figura 4.4.



**Figura 4.4:** Esquema do Acelerador Tandem de 3 MV da UFA-LFI/ITN, linha de reacções nucleares/PIGE (Etapa de alta energia).

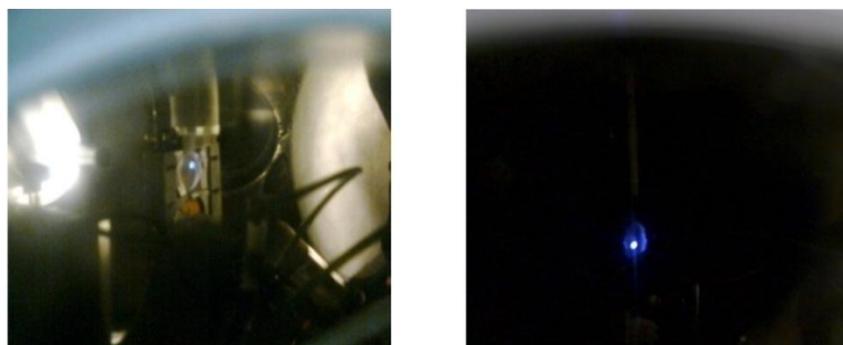
Os magnetos são construídos de modo a que o campo magnético aplicado seja perpendicular à velocidade dos iões. Segundo a Lei de Biot-Savart, a intensidade do campo magnético do magneto é directamente proporcional ao valor da corrente que circula nos seus enrolamentos. Deste modo, variando a corrente altera-se o campo magnético, podendo assim controlar-se a trajectória dos iões.

Ao longo da trajectória, estão dispostas 4 Gaiolas de Faraday amovíveis e actuadas pneumaticamente destinadas a medir a intensidade do feixe de partículas. A sua localização (ver Figura 4.4) junto dos elementos chave do sistema de transporte de feixe, permite otimizar os parâmetros destes elementos através da maximização da corrente medida por estas Gaiolas.



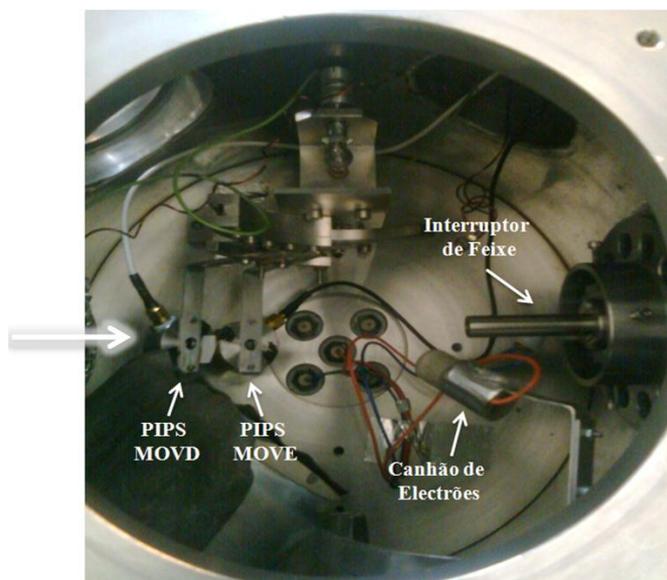
**Figura 4.5:** Gaiola de Faraday do novo sistema visor/medidor de intensidade de feixe, esquerda) antes de ser montada na linha; direita) depois de montada na linha vista pelo visor através da câmara de vídeo.

Algumas das Gaiolas de Faraday têm uma peça de quartzo, a qual permite visualizar o feixe por fluorescência. Em alguns casos, estão acopladas câmaras de vídeo que permitem fazer esta visualização à distância.



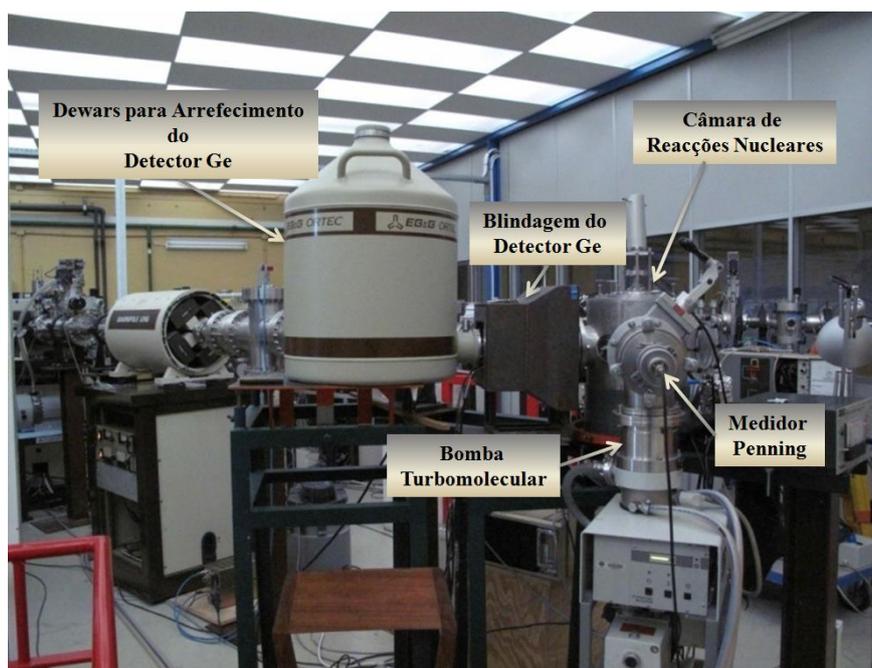
**Figura 4.6:** Fotografias do feixe realizadas pela câmara de vídeo situada na câmara de reacções nucleares, esquerda) com iluminação; direita) sem iluminação.

Na Figura 4.7 está representada a câmara de reacções nucleares, onde são colocadas as amostras que se pretendem estudar.



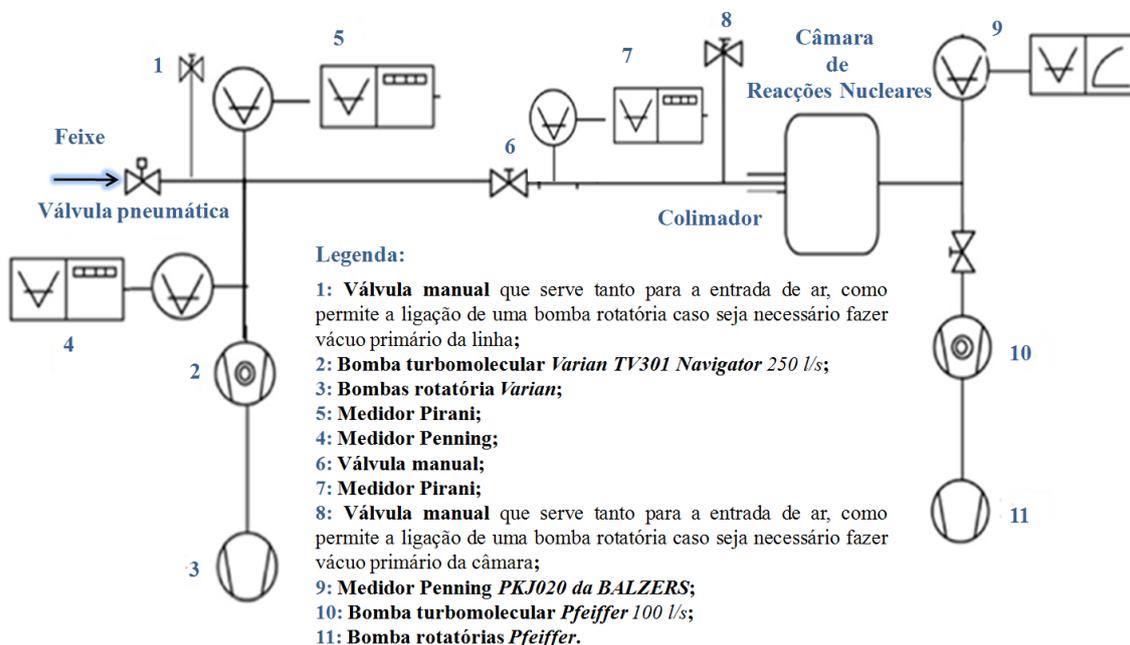
**Figura 4.7:** Interior da câmara de reacções nucleares, onde estão representados os detectores de Si MOVD e MOVE, o interruptor de feixe e canhão de electrões (que não foi utilizado neste trabalho).

A linha onde foi realizada a experiência está representada na Figura 4.8.



**Figura 4.8:** Linha de Reacções Nucleares/PIGE do acelerador Tandem.

O sistema de vácuo desta linha está representado na Figura 4.9.



**Figura 4.9:** Esquema do sistema de vácuo da linha de Reacções Nucleares/PIGE do acelerador Tandem.

Este sistema está dividido em duas etapas. A primeira é assegurada por uma bomba rotatória e por uma bomba turbomolecular *Pfeiffer*. A segunda contém uma bomba rotatória para o vácuo primário e uma bomba turbomolecular *Varian*.

Os medidores Pirani e Penning da primeira etapa são todos da marca *Edwards* os modelos *PRL10 P021 58-000* e *CP25-S P145-33-000*, respectivamente. O medidor Penning da câmara de reacções nucleares é da marca *Edwards* e permite medir tanto o vácuo primário como alto vácuo. A pressão atingida na câmara com este sistema de alto vácuo é de  $10^{-7}$  mbar.

#### 4.1.2. Detector Ge (HP)

O princípio básico dos detectores tem como fundamento a transferência de parte ou de toda a energia da radiação incidente para o material do detector, onde é convertida noutra forma, mais acessível à percepção humana.

A transferência de energia incidente faz-se por excitação e ionização dos átomos e/ou moléculas do material do detector.

Neste trabalho é utilizado um detector de estado sólido. Neste tipo de detector as partículas carregadas deixam um rasto de pares electrão-lacuna. A informação é obtida pela carga induzida recolhida e lida por electrónica adequada.

Um detector pode ser caracterizado pela sua sensibilidade, resposta, resolução em energia, eficiência e pelo tempo morto.

A sensibilidade a um determinado tipo de partícula e a uma gama de energia, depende das secções eficazes envolvidas, do volume do detector, do ruído electrónico e do material de protecção. No caso dos fótons e para as energias de interesse, o seu livre percurso médio no ar é da ordem  $9 \times 10^{-3}$  cm logo para que a eficiência de detecção dos fótons seja elevada, são necessários detectores com densidade e volume activo elevados.

A resposta do detector é dada pela relação amplitude-energia. O impulso eléctrico é proporcional à energia absorvida no detector.

A resolução em energia é uma medida da capacidade de o detector distinguir dois valores de energia próximos.

A eficiência de um detector de estado sólido é dada pela razão entre os eventos detectados e os eventos emitidos pela fonte.

O tempo morto é o tempo necessário ao sistema de detecção para processar um evento. Durante esse tempo há perda de eventos.

Nesta experiência o detector de radiação gama utilizado é um detector de Ge(HP). Segundo informação do fabricante este é revestido por uma capa de alumínio de 1 mm de espessura, tem um diâmetro de 64 mm, uma espessura de 62,6 mm e uma camada inactiva de com uma espessura de 0,7 mm. Apresenta uma resolução de 1,76 keV para a risca de referência de 1173 keV do  $\text{Co}^{60}$  e uma eficiência intrínseca de 45 %, em relação a um detector de cintilação de NaI(Tl) com resolução de 56 keV para a energia de 662 keV do  $^{137}\text{Cs}$  [13].

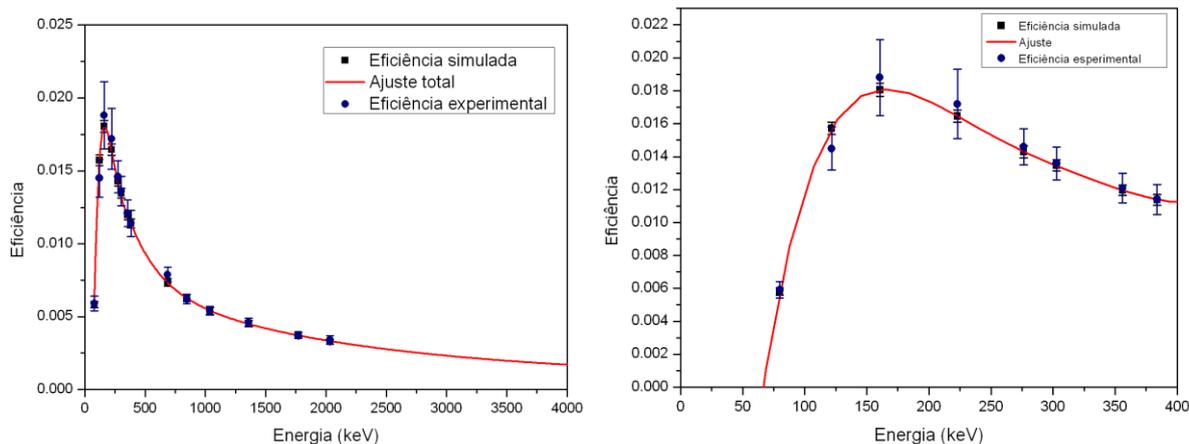
O detector é arrefecido com azoto líquido, e está a uma distância do alvo de 55,5 mm relativamente à linha do feixe.

A eficiência do detector de Ge(HP), utilizado na linha de Reacção Nucleares/PIGE do acelerador Tandem da UFA-LFI/ITN, foi calculada anteriormente simulando o detector com o programa de Monte Carlo PENELOPE [8] e validada experimentalmente utilizando fontes radioactivas calibradas conforme está apresentado na Tabela 4.1 [15].

**Tabela 4.1:** Eficiência experimental determinada a partir das fontes radioactivas:  $^{152}\text{Eu}$ ,  $^{56}\text{Co}$  e  $^{133}\text{Ba}$ , calibradas em eficiência [15].

Energia dos fótons	Eficiência Experimental	Incerteza
80,0	0,0059	0,0005
121,8	0,0145	0,0013
160,6	0,0188	0,0023
223,1	0,0172	0,0021
276,4	0,0146	0,0011
302,8	0,0136	0,001
356,0	0,0121	0,0009
356,0	0,0121	0,0009
383,8	0,0114	0,0009
688,7	0,0079	0,0005
846,8	0,0062	0,0003
1037,8	0,0054	0,0003
1360,2	0,0046	0,0003
1771,3	0,0037	0,0002
2034,7	0,0034	0,0003

A eficiência determinada através do programa de simulação, a eficiência experimental e os respectivos ajustes aos valores simulados são apresentados na Figuras 4.10.



**Figura 4.10:** esquerda) Ajuste total da eficiência do detector de radiação  $\gamma$  [8]; direita) Ajuste polinomial da eficiência do detector de radiação  $\gamma$  simulada para a região de baixas energias [8].

Como se pode verificar através da Tabela 4.1 e da Figura 4.10 os valores experimentais estão concordantes com os simulados pelo programa PENELOPE [10].

### 4.1.3 Cadeia electrónica de detecção

Os detectores de radiação produzem sinais eléctricos que devem ser tratados por sistemas electrónicos.

Os aparelhos electrónicos concebidos para a Física Nuclear obedecem a padrões ou normas internacionais.

Os padrões fixam o tamanho das unidades electrónicas de modo a estas entrarem nos cestos de alimentação e de modo a serem permutadas facilmente.

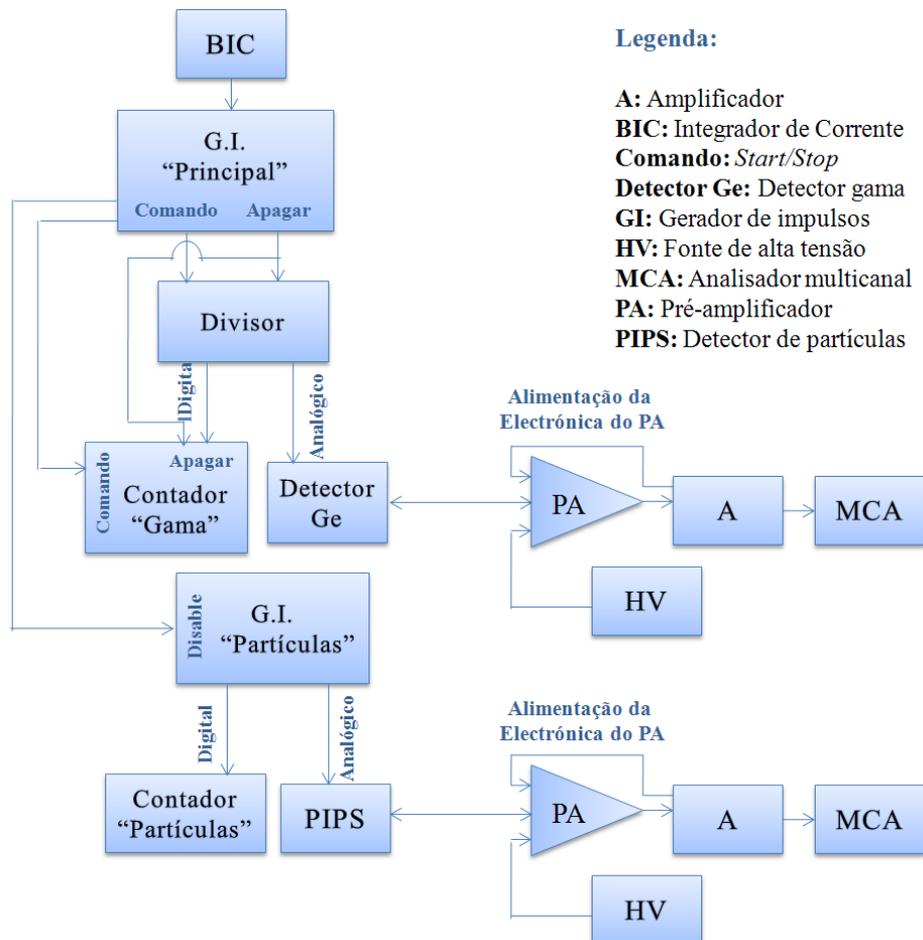
As crates utilizadas nesta experiência armazenam e alimentam os circuitos dos módulos electrónicos fornecendo tensões de  $\pm 6V$ ,  $\pm 12V$ ,  $\pm 24V$ . Cada módulo electrónico aceita e/ou gera sinais, lógicos ou analógicos (ver Figura 4.11).



**Figura 4.11:** Electrónica do sistema de detecção de radiação gama e de partículas carregadas utilizado nesta experiência.

Os impulsos eléctricos provenientes do detector são processados pela cadeia electrónica a ele associada, constituída por um pré-amplificador, um amplificador linear e um analisador multicanal (MCA).

Na Figura 4.12 está esquematizada a cadeia electrónica utilizada neste trabalho.



**Figura 4.12:** Esquema utilizado para a electrónica do sistema de detecção de radiação gama e de detecção de partículas carregadas.

De seguida descrevem-se as funções básicas de cada componente dessa cadeia.

O pré-amplificador amplifica, com pouco ganho, os sinais geralmente muito fracos, vindos dos detectores. Como o sinal é fraco, o ruído electrónico deve ser mínimo. O pré-amplificador deve estar junto do detector para minimizar o ruído captado nos cabos, ou seja, a capacidade intrínseca dos cabos deve ser minimizada.

Neste trabalho é utilizado um pré-amplificador de carga. Como este tem uma capacidade intrínseca de junção altamente sensível às variações de temperatura, a corrente do detector é integrada na própria capacidade do pré-amplificador.

No amplificador linear a amplitude do sinal de entrada é proporcional à energia da partícula que lhe deu origem. O amplificador linear deve amplificar o sinal, de modo a que o sinal à saída (0 - 10 V), seja compatível com a entrada do multicanal. O amplificador linear deve ainda alterar a forma do sinal vindo do pré-amplificador, de modo a evitar uma cauda tão longa, que facilita o empilhamento. A

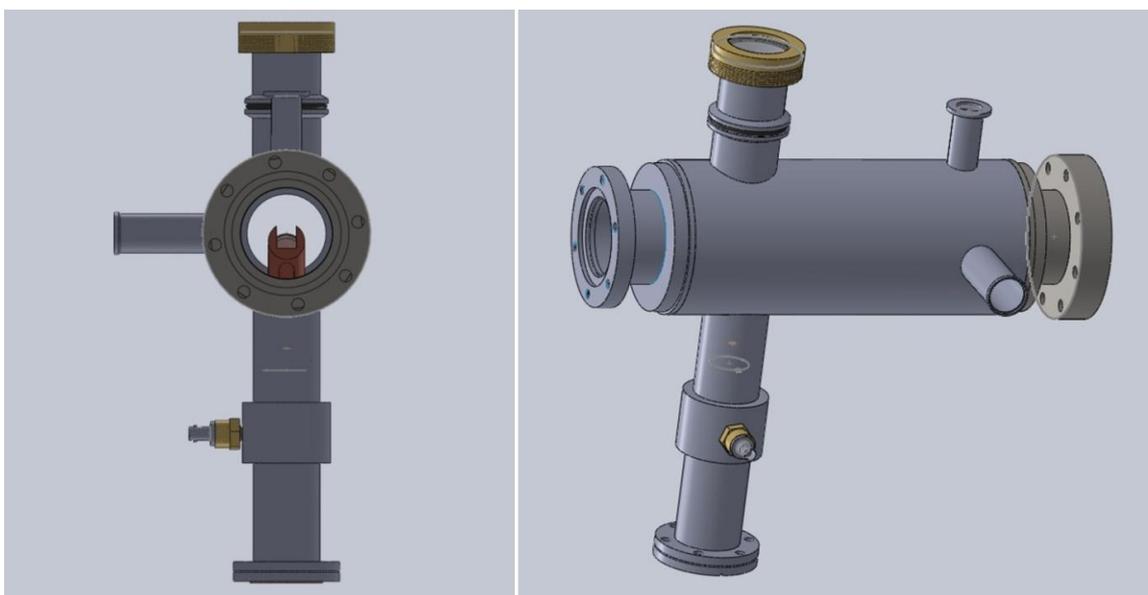
nova forma do impulso minimiza também os efeitos do ruído electrónico, isto é, otimiza a relação sinal/ruído.

O analisador multicanal (MCA) é um dispositivo complexo que digitaliza a amplitude dos sinais analógicos de entrada num certo número de canais ( $\geq 1024$ ). Cada canal está associado a um contador que conta o número de impulsos com uma dada amplitude discretizada. O elemento central deste analisador é, portanto, um conversor analógico-digital (ADC, do inglês *Digital-to-Analog Converter*). Esta digitalização permite registar em suporte informático os espectros de energia das partículas.

#### 4.1.4. Concepção, projecção e elaboração do sistema visor/medidor de feixe

Um dos objectivos deste trabalho é otimizar a linha de Reacções Nucleares/PIGE do acelerador Tandem. Para tal, foi dimensionado, construído, montado e testado nesta linha, um novo sistema visor/medidor de intensidade de feixe.

Este sistema está esquematizado na Figura 4.13. No anexo 2 são apresentados os desenhos técnicos das várias peças.



**Figura 4.13:** Sistema visor/medidor de intensidade de feixe esquerda) vista frontal, direita) vista de lado.

As peças deste projecto foram desenhadas no programa SolidWorks® [16], construídas e soldadas no ITN, aproveitando-se ao máximo o material já existente.

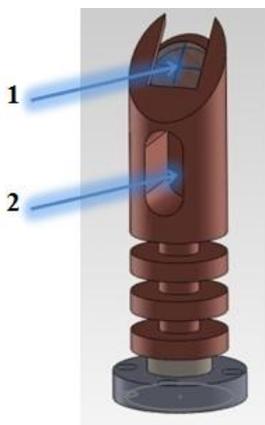
Para garantir o bom funcionamento da peça foi necessário fazer a sua limpeza minuciosa e os testes de fugas antes da sua montagem.



**Figura 4.14:** Sistema visor/medidor de intensidade de feixe antes de ser montado na linha de Reacções Nucleares/PIGE.

A Gaiola de Faraday, é um dispositivo móvel utilizado para alinhar e medir a intensidade de corrente de um feixe de partículas carregadas.

Consiste numa câmara metálica, que contém um varão de cobre com uma reentrância escavada nesse material e onde o feixe de partículas vai incidir. A reentrância com 19 mm de profundidade, 26 mm de altura e 10 mm de largura, visa minimizar a fuga de electrões secundários ejetados do cobre quando o feixe a atinge. A carga colectada é conduzida por um cabo eléctrico para um instrumento de medição (normalmente um integrador de corrente).



**Figura 4.15:** Gaiola de Faraday do novo sistema visor/medidor de intensidade de feixe onde se pode ver o feixe a incidir na posição 1 ou na posição 2, conforme o pretendido.

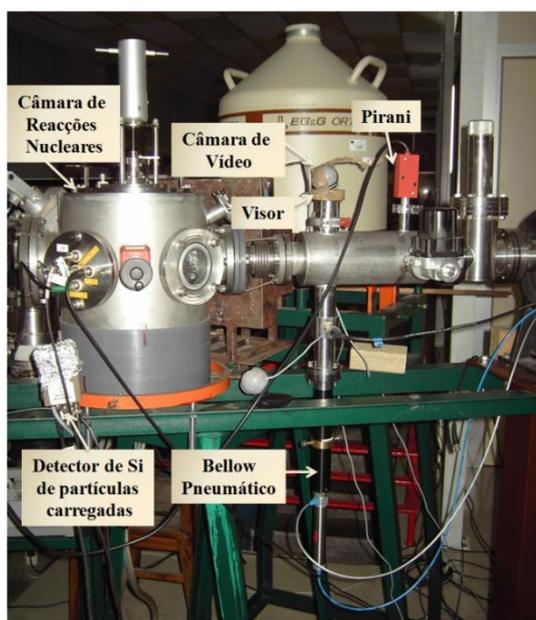
Uma particularidade que torna esta Gaiola de Faraday única é o facto de ela ter sido projectada de modo a conter uma peça de quartzo, que funciona como uma mira e que permite, com o auxílio de uma câmara de vídeo, a visualização à distância do feixe de protões. Desta forma é possível obter informação sobre a posição e focagem do feixe de protões.

À Gaiola de Faraday está acoplado um bellow pneumático (4" PNEUMATIC 70FC), de modo, a se obter as três posições desejadas. O bellow é activado através de uma válvula pneumática 3/2 (3 vias e 2 estados).

Para o correcto funcionamento do sistema visor/medidor de intensidade de feixe foi necessário colocar-se um batente no Bellow de modo a que a Gaiola de Faraday usufruísse das três posições desejadas.

O funcionamento da Gaiola de Faraday é bastante simples e útil, quando a válvula está desactivada a Gaiola de Faraday está na posição mais baixa, o feixe passa no tubo e segue em direcção à câmara onde é irradiada a nossa amostra, quando a válvula está activada e o bellow não tem colocado o batente, a Gaiola de Faraday está na posição mais a cima e o feixe passa mesmo no centro da Gaiola de Faraday o que nos permite medir a intensidade da corrente do feixe (corresponde à posição 1 da figura 4.15), quando a válvula está activada e o bellow tem o batente colocado, a Gaiola de Faraday está na posição intermédia e funciona como visor que permite a focagem e alinhamento do feixe (corresponde à posição 2 da figura 4.15).

Na figura 4.16 é apresentado o sistema visor/medidor de intensidade de feixe montado à entrada da câmara de reacções nucleares da linha de Reacções Nucleares/PIGE.



**Figura 4.16:** Sistema visor/medidor de intensidade de feixe montado à entrada da câmara de reacção nucleares da linha de Reacções nucleares/PIGE.

## 4.2. Preparação e metodologia experimental

Nesta secção serão explicados todos os detalhes associados à preparação e elaboração de alvos finos e à metodologia seguida na experiência.

### 4.2.1. Preparação e elaboração do alvo fino

Para uma medição correcta da secção eficaz é necessário ter um conhecimento preciso da composição e da espessura do alvo. Estas propriedades devem manter-se estáveis durante bombardeamento do alvo, com um feixe de prótons, ao longo da experiência.

O primeiro passo para se elaborar um alvo fino é decidir quais os compostos a utilizar. Nesta experiência é utilizado um alvo fino composto por um filme de NaF depositado sobre um filme de Ag auto-sustentada. Escolheu-se o NaF porque permite a análise simultânea (através dos espectros de radiação gama) das reacções  $^{23}\text{Na}(p,p'\gamma)^{23}\text{Na}$  e  $^{19}\text{F}(p,p'\gamma)^{19}\text{F}$ .

Também é necessário calcular as quantidades que vão ser utilizadas para cada composto. Este cálculo é muito importante, pois dele depende a concepção do alvo e a obtenção de bons resultados. Se o alvo for demasiado grosso, o feixe vai perdendo energia ao longo das camadas, logo a energia incidente vai variar. Se o alvo for demasiado fino o rendimento pode ser insuficiente, não se distinguindo as riscas gama que se pretendem estudar do fundo que está sempre presente.

O alvo utilizado neste trabalho foi feito evaporando sequencialmente 40 mg de prata e 17 mg de fluoreto de sódio. A evaporadora da UFA-LFI/ITN atinge pressões próximo de  $2 \times 10^{-6}$  mbar, o que permite minimizar a incorporação de carbono e oxigénio no alvo durante a evaporação.



**Figura 4.17:** Evaporadora do UFA-LFI/ITN.

#### 4.2.2. Metodologia utilizada nesta experiência

O principal objectivo desta experiência é medir a secção eficaz total da transição correspondente à emissão de um fóton de 440 keV, na reacção nuclear  $^{23}\text{Na}(p,p'\gamma)^{23}\text{Na}$ , utilizando a técnica de PIGE.

Antes de se efectuar um trabalho com alvos finos é necessário caracterizar a sua composição e a sua espessura.

Neste caso, para um alvo de NaF/Ag tem que se determinar a espessura dos dois filmes que compõem o alvo, o evaporado de NaF e o auto-sustentado de Ag.

Para esse efeito, foram acumulados dois espectros  $\alpha$  por RBS, na câmara pequena da linha de materiais do acelerador Van de Graaff de 2,5 MV da UFA-LFI/ITN.

O feixe de  $^4\text{He}^+$  incidiu sobre o filme evaporado para duas energias incidentes diferentes  $E_{\text{lab}} = 1600$  keV e de  $E_{\text{lab}} = 1800$  keV, com um ângulo de incidência de  $0^\circ$ . Os espectros de RBS para partículas  $\alpha$  foram registados por dois detectores de partículas carregadas PIPS posicionados a  $\theta_{\text{lab}} = 165^\circ$  e a  $\theta_{\text{lab}} = 140^\circ$ .

As medidas de PIGE foram efectuadas na linha de Reacções Nucleares/PIGE do acelerador Tandem de 3 MV da UFA-LFI/ITN.

O feixe de  $\text{H}^+$  incidiu sobre o filme com um ângulo de incidência de  $0^\circ$ , o detector de partículas carregadas PIPS "MOVD" a  $\theta_{\text{lab}} = 157^\circ$  e na gama de energias de 2100 a 4040 keV.

A intensidade de corrente do feixe de prótons foi mantida num intervalo de 30 nA a 100 nA, para evitar exageradas correcções de tempo morto nos espectros colectados.

Para focar o feixe dentro da câmara, colocou-se juntamente com o alvo, um quartzo no porta-amostras da câmara. Através da câmara de vídeo minimizou-se a corrente na chapa de níquel que protege o suporte do colimador, desta forma conseguiu-se focar o feixe com um diâmetro de 1 a 2 mm.

Observaram-se os sinais do detector no multicanal e acumularam-se os espectros de partículas carregadas e de radiação gama durante tempo suficiente, de modo a se obter uma boa estatística (o valor da carga acumulada por espectro é 10 mC).

Os passos em energia utilizados nesta experiência fora das ressonâncias foram de 4 keV a 9 keV e perto das ressonâncias foram de 2 keV, o mínimo possível, de forma a obter as ressonâncias com precisão.

As energias das principais ressonâncias do Na e do F para o intervalo de energias incidentes utilizadas nesta experiência, são apresentadas na Tabela 4.2.

**Tabela 4.2:** Energias das Principais Ressonâncias do Na e do F para o intervalo de energias incidente de 2100 a 4040 keV.

<b>Principais Ressonâncias do Na (keV)</b>	<b>Principais Ressonâncias do F (keV)</b>
2215	2662
2283	2784
2337	3345
2437	4000
2538	
2691	
2854	
3047	
3159	
3350	
3595	
3768	
3350	

## 5. Resultados e sua análise

Este capítulo é dedicado à análise da reacção  $^{23}\text{Na}(p,p'\gamma)^{23}\text{Na}$ , sendo apresentados os resultados obtidos durante a experiência e feitas algumas comparações com os resultados referidos no Capítulo 2.

A reacção estudada neste trabalho apresenta uma distribuição isotrópica [10].

Os programas utilizados para calcular as áreas dos picos e os respectivos ajustes foram o RMCA [17], Origin® [18] e NDF [19].

Nesta análise foi verificada a reprodutibilidade dos resultados.

No anexo 1 são apresentadas as tabelas com valores das secções eficazes.

### 5.1. Calibração em energia do acelerador Tandem

Antes de se começar a experiência é necessário fazer a calibração em energia do acelerador Tandem.

Esta calibração foi feita a partir da medição das ressonâncias das reacções nucleares da Tabela 5.1.

**Tabela 5.1:** Reacções nucleares utilizadas para a calibração do acelerador Tandem, onde  $\Gamma$  é a largura natural da ressonância. Para as ressonâncias de 2914 keV e 3660 keV não existe informação disponível sobre  $\Gamma$ .

Energia dos prótons (keV)	Radiação $\gamma$ (keV)	$\Gamma$ (keV)	Reacção
1645,1	440	8,0	$^{23}\text{Na}(p,p'\gamma)^{23}\text{Na}$
1930,7	440	6,9	$^{23}\text{Na}(p,p'\gamma)^{23}\text{Na}$
2413,0	1369	0,3	$^{24}\text{Mg}(p,p'\gamma)^{24}\text{Mg}$
2914,0	1369	-	$^{24}\text{Mg}(p,p'\gamma)^{24}\text{Mg}$
3660,0	1369	-	$^{24}\text{Mg}(p,p'\gamma)^{24}\text{Mg}$

Para efectuar esta calibração utilizaram-se três alvos. Um alvo fino composto por um filme NaF depositado sobre uma chapa de cobre (Cu), outro alvo fino composto por um filme de Mg metálico depositado sobre chapa de tântalo (Ta) e outro alvo espesso de Mg.

Na Figura seguinte está representada a recta de calibração em energia, obtida a partir das ressonâncias.

### Recta de Calibração em Energia

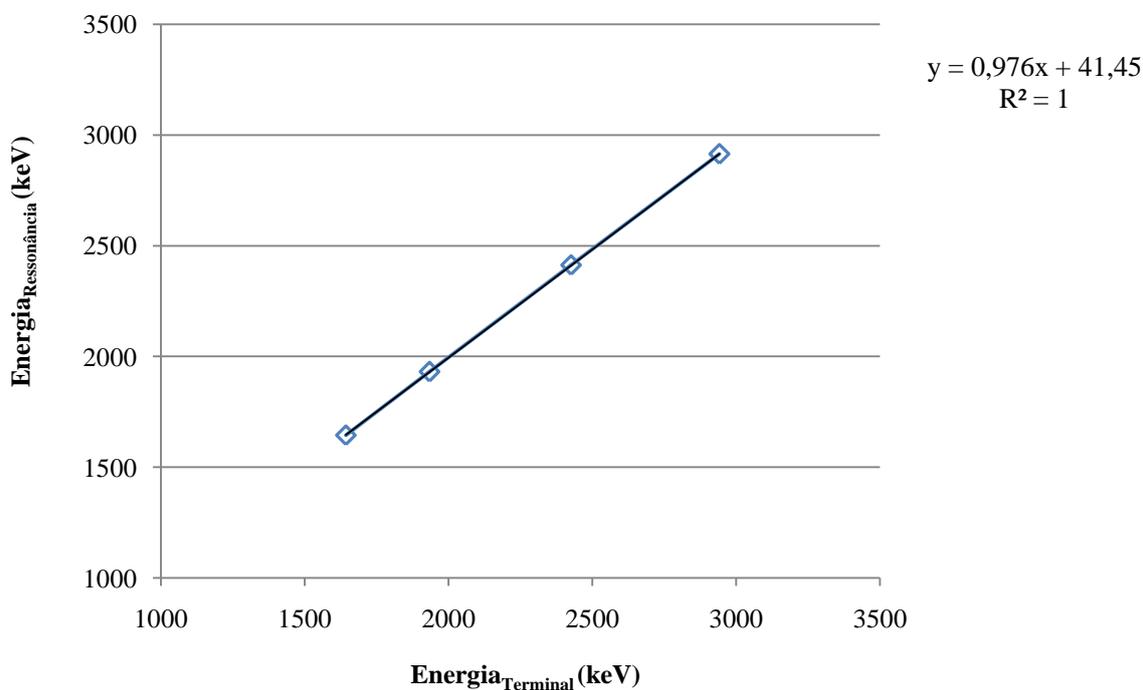


Figura 5.1: Recta de calibração em energia do acelerador Tandem.

Pela observação do Figura 5.1, constata-se que para um feixe de  $H^+$ , a calibração em energia foi igual a:

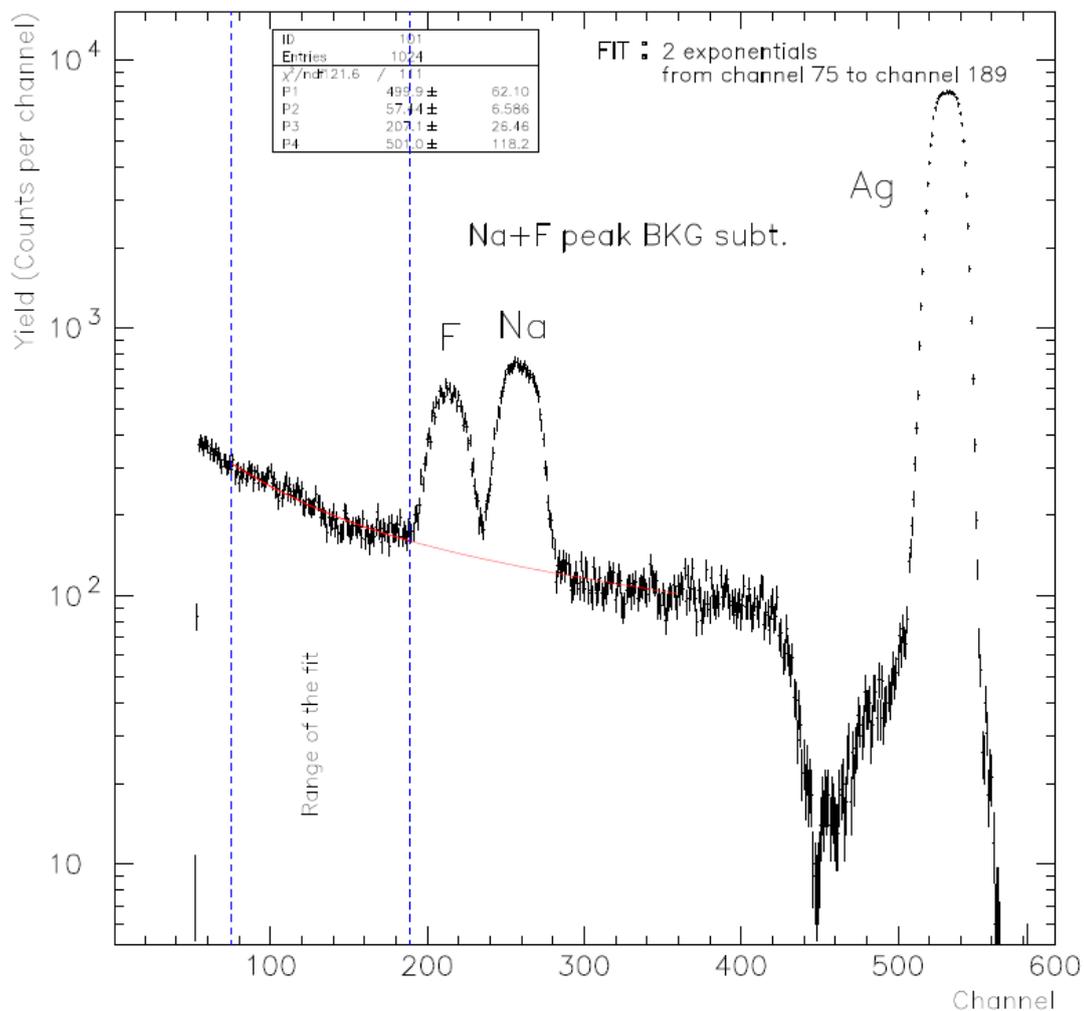
$$E = 0,976(TV_{nominal} \times 2) + 41,45 \quad [\text{keV}] \quad (5.1)$$

onde  $TV_{nominal}$  é a tensão aplicada pelo utilizador dada em kV.

### 5.2. Determinação da estequiometria do alvo

Através da técnica de RBS é possível caracterizar o alvo de NaF/Ag em termos da sua estequiometria e da sua espessura.

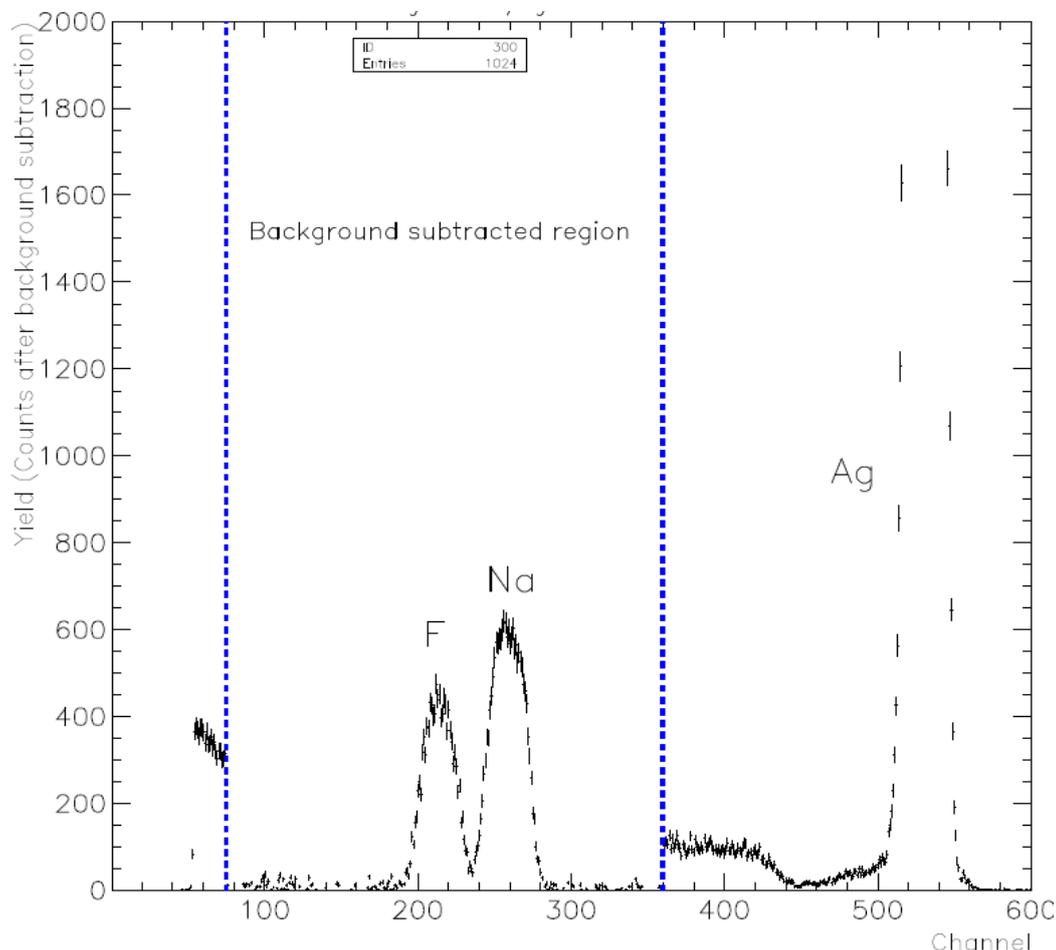
O espectro RBS para uma  $E_{lab} = 1800$  keV está representado na Figura 5.2, onde os picos resultam da dispersão coulombiana das partículas do feixe pelos núcleos de F, Na e Ag de acordo com as reacções  $^{19}\text{F}(\alpha,\alpha)^{19}\text{F}$ ,  $^{23}\text{Na}(\alpha,\alpha)^{23}\text{Na}$  e  $\text{Ag}(\alpha,\alpha)\text{Ag}$ .



**Figura 5.2:** Espectro de RBS do alvo NaF/Ag para uma energia  $E_{lab} = 1800$  keV, com um ângulo de incidência a  $0^\circ$  e com o detector PIPS a  $\theta_{lab} = 165^\circ$ , registado no acelerador Van de Graaff de 2,5 MV.

Como se pode verificar, os picos de Na e de F aparecem perfeitamente individualizados no espectro. O fundo contínuo que se observa por baixo destes picos resulta da dispersão dos iões do feixe que atravessam o alvo, obtidos com as paredes da câmara do alvo que atinge o detector PIPS.

A partir de 2 exponenciais foi possível retirar o fundo contínuo que se observa por baixo dos picos (ver Figura 5.3).



**Figura 5.3:** Espectro de RBS do alvo NaF/Ag, sem fundo, para uma energia  $E_{lab} = 1800$  keV, com um ângulo de incidência a  $0^\circ$  e com o detector PIPS a  $\theta_{lab} = 165^\circ$ , registado no acelerador Van de Graaff de 2,5 MV.

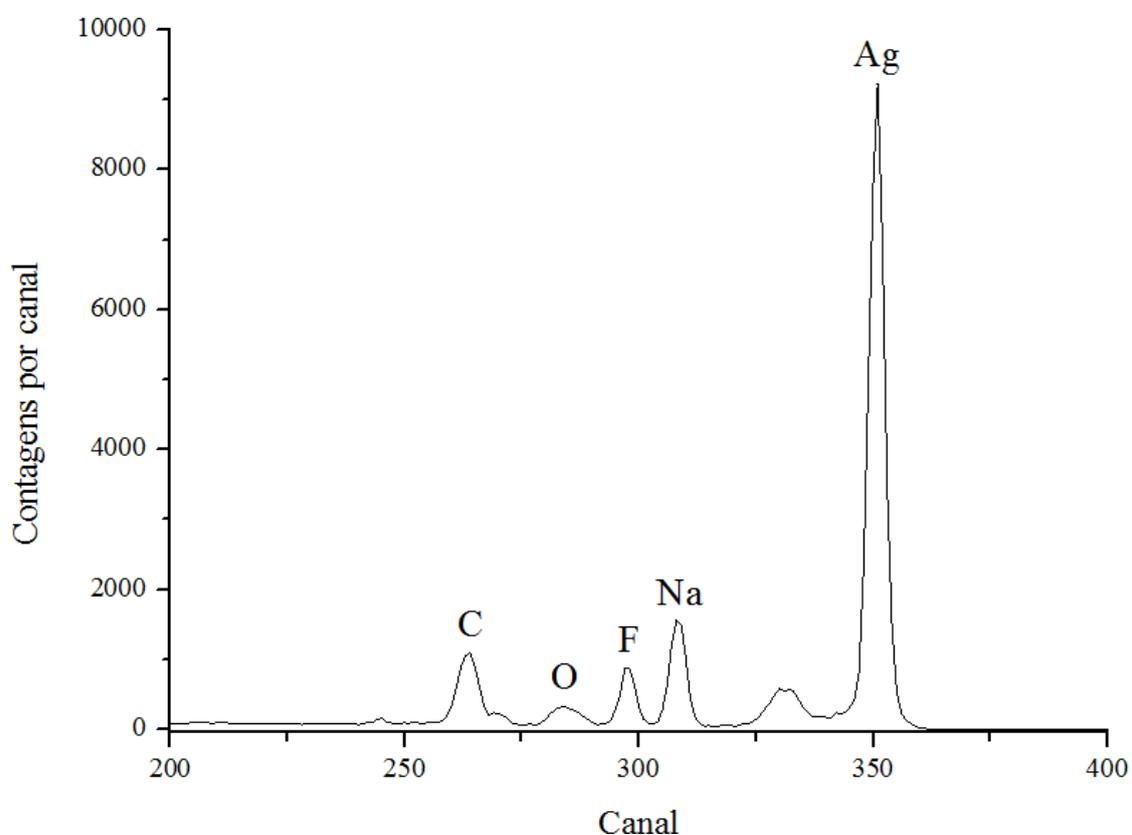
A partir das equa es do subcapítulo 2.4 para um alvo da NaF/Ag obteve-se:

- A razão estequiométrica de NaF    $r = 1: Na_{0,5} F_{0,5}$ , logo não existe contamina o de outros elementos;
- O filme de NaF possui uma densidade superficial de  $1,025 \times 10^{18}$  at/cm<sup>2</sup>;
- O filme de Ag apresenta  $Ag_{0,9} O_{0,1}$ , logo existe contamina o de 10 % de oxig nio;
- O filme de Ag possui uma densidade superficial de  $3,57 \times 10^{17}$  at/cm<sup>2</sup>;
- O alvo de NaF tem uma espessura de  $\Gamma = 36$   $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ .

### 5.3 Determinação da secção eficaz total da reacção $^{23}\text{Na}(p,p'\gamma)^{23}\text{Na}$

Para determinar experimentalmente a secção eficaz da reacção nuclear em estudo ( $^{23}\text{Na}(p,p'\gamma)^{23}\text{Na}$  para o gama  $\gamma = 440$  keV), foram colectados dois tipos de espectros em simultâneo, os espectros de partículas carregadas e os espectros gama.

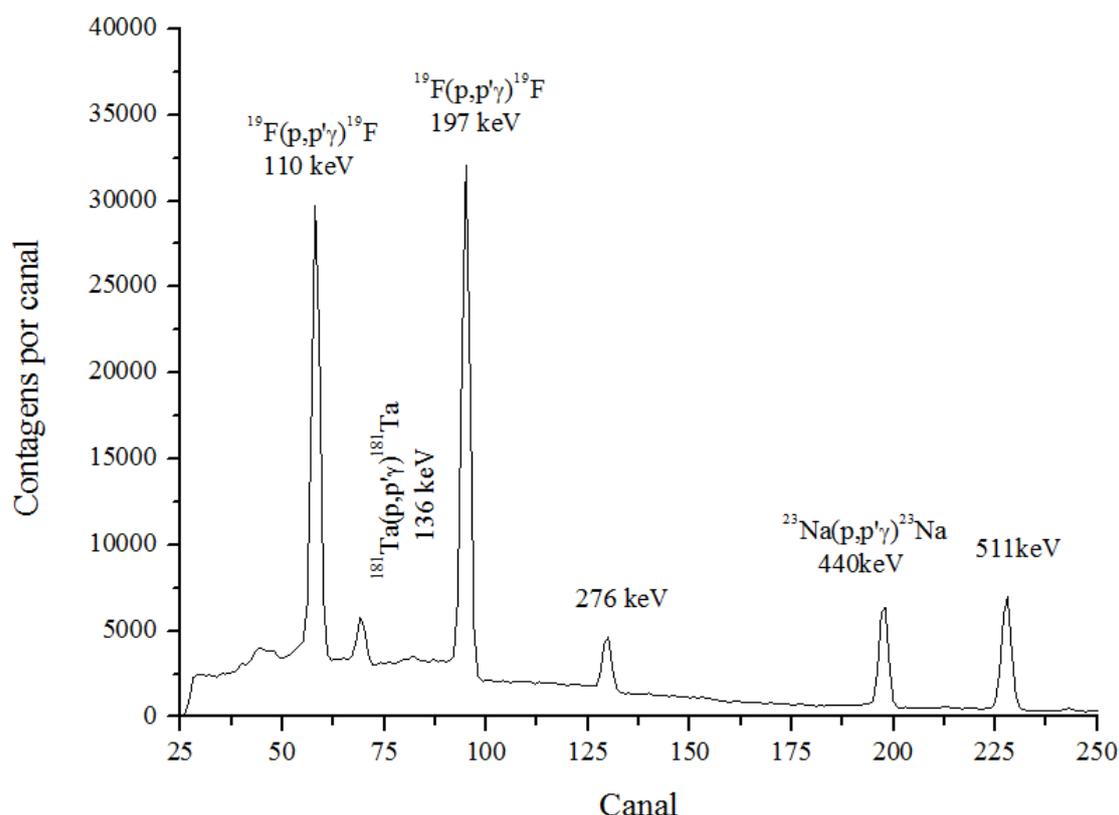
Na Figura 5.4 está representado o espectro de partículas carregadas para a energia incidente de  $E_{\text{lab}} = 2342,8$  keV.



**Figura 5.4:** Espectro de partículas carregadas para uma energia  $E_{\text{lab}} = 2342,8$  keV, com um ângulo de incidência a  $0^\circ$  e o detector PIPS a  $\theta_{\text{lab}} = 157^\circ$ , adquirido no acelerador Tandem de 3 MV na linha de Reacções Nucleares/PIGE.

Pela observação da Figura 5.4 verifica-se que neste espectro estão presentes vários elementos tais como, C, O, F, Na, Ag e partículas  $\alpha$  e prótons provenientes das reacções nucleares  $^{23}\text{Na}(p,p'\gamma)^{23}\text{Na}$ ,  $^{19}\text{F}(p,p'\gamma)^{19}\text{F}$ ,  $^{19}\text{F}(p,\alpha\gamma)^{16}\text{O}$  e  $^{23}\text{Na}(p,\alpha\gamma)^{20}\text{Ne}$ . Para além disso neste espectro também se averigua que a Ag apresenta um pico bem definido.

Na Figura 5.5   apresentado o espectro de radia o gama para a energia incidente de  $E_{lab} = 2342,8$  keV, onde se podem observar as reac es nucleares do  $^{19}\text{F}(p,p'\gamma)^{19}\text{F}$  para o  $\gamma = 110$  e  $\gamma = 197$  keV, do  $^{181}\text{Ta}(p,p'\gamma)^{181}\text{Ta}$  para o  $\gamma = 136$ , do  $^{23}\text{Na}(p,p'\gamma)^{23}\text{Na}$  para o  $\gamma = 440$  keV. Através desta figura também   visível o pico em torno de 511 keV, proveniente de processos de aniquila o de positrões ou de produ o de pares do  $\gamma$  de alta energia do F.



**Figura 5.5:** Espectro de radia o gama para uma energia  $E_{lab} = 2342,8$  keV, adquirido no acelerador Tandem de 3 MV na linha de Reac es Nucleares/PIGE.

Pelo procedimento descrito no subcapítulo 2.5.1   possível calcular a sec o eficaz. Com uma espessura em energia de  $\Delta E_p(\text{NaF}) = 4,04$  keV para protões com  $E_{lab} = 2342,8$  keV, com  $\varepsilon_\gamma = 0,0096$ , a sec o eficaz do alvo fino de NaF/Ag para o  $\gamma = 440$  keV,    $\sigma = 0,0578$  barn.

As incertezas associadas às sec es eficazes são calculadas a pela expressão seguinte:

$$\delta \frac{d\sigma}{d\Omega} = \sqrt{\left(\frac{\partial \sigma}{\partial Y_\gamma^{Na}}\right)^2 (\delta Y_\gamma^{Na})^2 + \left(\frac{\partial \sigma}{\partial N_p}\right)^2 (\delta N_p)^2 + \left(\frac{\partial \sigma}{\partial N_{Na}}\right)^2 (\delta N_{Na})^2 + \left(\frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon_{abs}}\right)^2 (\delta \varepsilon_{abs})^2} \quad (5.2)$$

onde  $\delta Y_\gamma^{Na}$  é a incerteza associada ao rendimento da radiação gama para a emissão do  $\gamma = 440$  keV do Na. Sendo  $\delta N_p$ ,  $\delta N_{Na}$ ,  $\delta \varepsilon_{abs}$ , respectivamente, os valores das incertezas associadas ao número de prótons incidentes, ao número de átomos por unidade de área de Na e à eficiência absoluta do detector de radiação gama, determinados por estimativa.

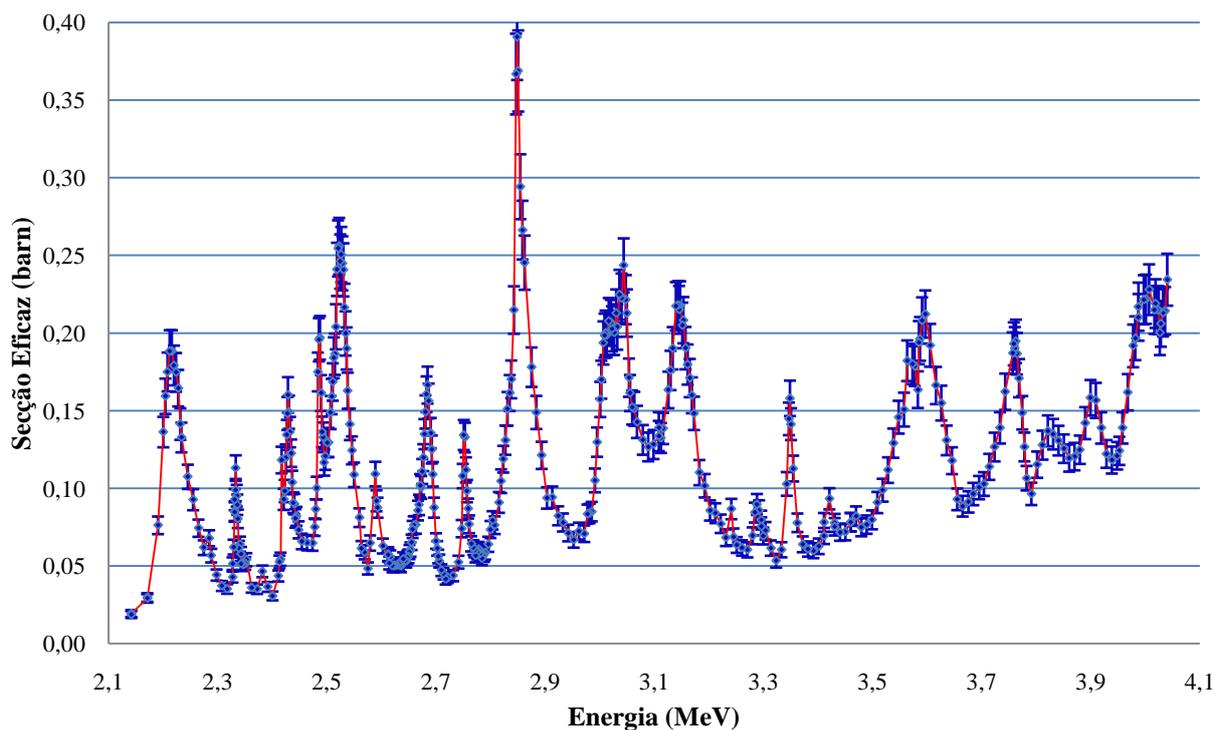
$$\delta N_p = 0,04$$

$$\delta N_{Na} = 0,03$$

$$\delta \varepsilon_{abs} = 0,05$$

Na Figura 5.6 está representada secção eficaz total da risca de 440 keV da reacção  $^{23}\text{Na}(p,p'\gamma)^{23}\text{Na}$ , com as respectivas barras de erro, para o intervalo de energias de 2100 a 4040 keV.

**Função de Excitação  $^{23}\text{Na}(p,p'\gamma)^{23}\text{Na}$ ,  $\gamma=440\text{keV}$**



**Figura 5.6:** Função de excitação da emissão da radiação gama de 440 keV da reacção  $^{23}\text{Na}(p,p'\gamma)^{23}\text{Na}$  no intervalo de energias de 2100 a 4040 keV, adquirido no acelerador Tandem de 3 MV na linha de Reacções Nucleares/PIGE.

Nas Tabelas seguintes estão representadas, para algumas energias, as razões entre as secções eficazes medidas neste trabalho e medidas por Mateus et al. [1] e Caciolli et al. [2], respectivamente.

**Tabela 5.2:** Razões entre a secção eficaz medida neste trabalho e a secção eficaz medida por Mateus et al. [1] para o alvo de NaF/Ag.

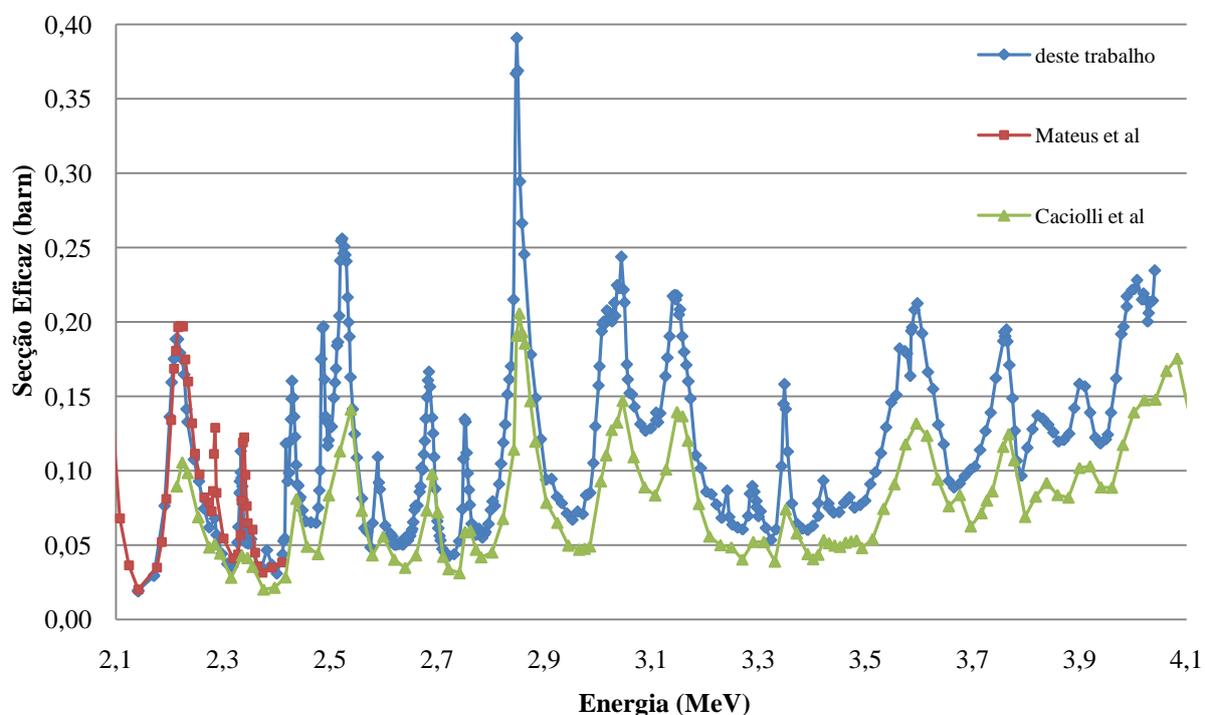
Energia (MeV)	Secção eficaz total (barn)	Razão $\sigma/\sigma_{\text{Mateus}}$
2,20	0,1363	1,016
2,39	0,0366	1,046
2,34	0,0804	1,004

**Tabela 5.3:** Razões entre a secção eficaz medida neste trabalho e a secção eficaz medida por Cacioli et al. [2] para o alvo de NaF/Ag.

Energia (MeV)	Secção eficaz total (barn)	Razão $\sigma/\sigma_{\text{Cacioli}}$
2,20	0,1363	1,292
2,40	0,0307	1,089
3,00	0,1701	1,285
3,40	0,0617	1,157
4,00	0,222	1,593

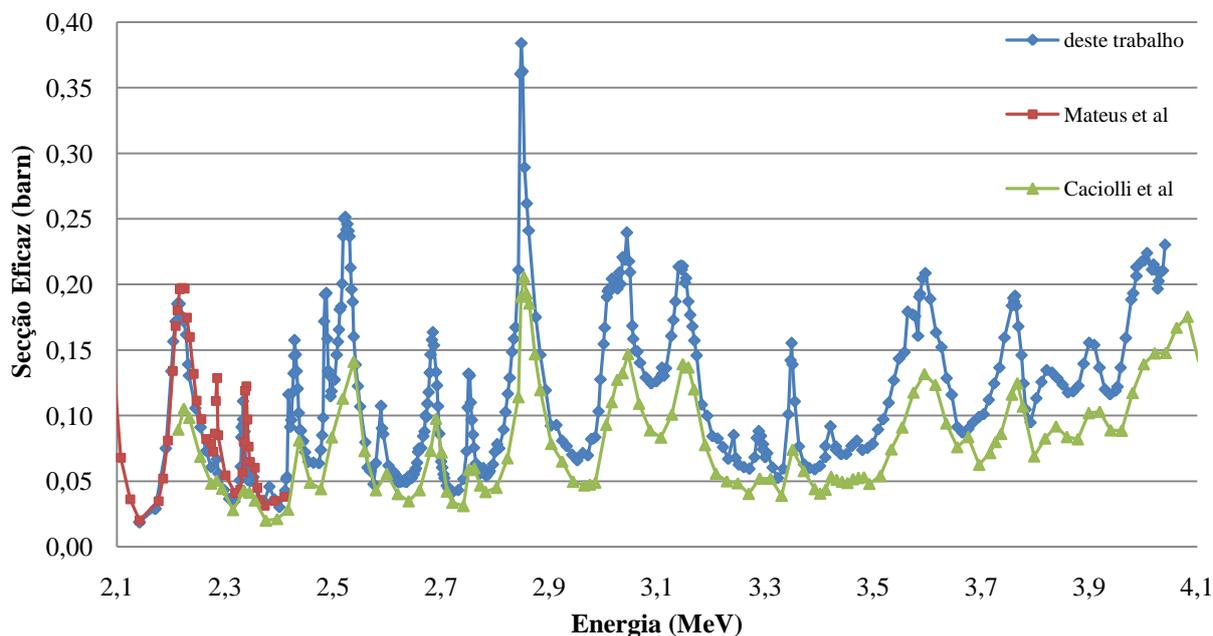
Nas Figuras seguintes (5.7 e 5.8) são apresentadas as comparações das secções eficazes medidas neste trabalho, medidas por Mateus et al. [1] e por Cacioli et al. [2], para duas energias de normalização diferentes escolhidas a rigor.

**Função de Excitação  $^{23}\text{Na}(p,p'\gamma)^{23}\text{Na}$ ,  $\gamma = 440 \text{ keV}$   
 $E_{\text{Normalização}} = 2342,8 \text{ keV}$**



**Figura 5.7:** Comparação entre as secções eficazes da risca de 440 keV da reacção  $^{23}\text{Na}(p,p'\gamma)^{23}\text{Na}$  obtidas neste trabalho e obtidas por Mateus et al. [1] e por Cacioli et al. [2].

**Função de Excitação  $^{23}\text{Na}(p,p'\gamma)^{23}\text{Na}$ ,  $\gamma = 440 \text{ keV}$**   
 $E_{\text{Normalização}} = 3460,3 \text{ keV}$



**Figura 5.8:** Comparação entre as secções eficaz da ressonância de 440 keV da reação  $^{23}\text{Na}(p,p'\gamma)^{23}\text{Na}$  obtidas neste trabalho e obtidas por Mateus et al. [1] e por Caciolli et al. [2].

Através da comparação das Figuras 5.7 e 5.8 é possível aferir que os valores obtidos neste trabalho são coerentes.

Embora a secção eficaz de Mateus et al. [1], tenha sido medida no acelerador Van de Graff, comparando com os resultados obtidos neste trabalho no intervalo de energias 2100 e 2400 keV, verifica-se que ambos apresentam as ressonâncias bem definidas e que os seus valores são coincidentes.

Pela observação destas Figuras verifica-se que neste trabalho as ressonâncias estão bem definidas, com um passo em energia mais pequeno que as ressonâncias de Caciolli et al. [2]. A curva da secção eficaz medida neste trabalho, no intervalo de energias de 2100 a 4040 keV, está sistematicamente acima da curva de Caciolli et al. [2]. Além disso apresenta um desvio em energia de aproximadamente 6 keV, comparativamente com a secção eficaz deste autor.

As discrepâncias obtidas nos valores das secções eficazes medidas neste trabalho e medidas por Caciolli et al [2], poderão dever-se a falhas no procedimento experimental destes autores, tais como:

- O alvo de Caciolli et al [2] ser demasiado espesso, aproximadamente 4 vezes a espessura do alvo usado por Mateus et al [1] e 2 vezes a espessura do alvo utilizado neste trabalho, o que influencia a forma das ressonâncias, ou seja, o rendimento integra na sua componente ressonante outra não ressonante o que se traduz num alisamento do espectro;

- Caciolli et al [2] realizaram a normalização para o Br (devido à pulverização do Br, a concentração deste elemento no início da experiência vai ser diferente da sua concentração no fim da experiência, logo é considerado um elemento instável) enquanto neste trabalho a normalização foi feita em relação à Ag (elemento muito estável);
- Erros nos ajustes da eficiência do detector;
- Erros no cálculo estequiometria do alvo.

## 6. Conclusões

Neste trabalho foi realizado o estudo da reacção  $^{23}\text{Na}(p,p'\gamma)^{23}\text{Na}$  utilizando-se a técnica de PIGE no acelerador Tandem da UFA-LFI/ITN.

Para tal foi projectado montado e testado com sucesso, um sistema visor/medidor de intensidade de feixe, na linha de Reacções Nucleares/PIGE, que permitiu obter informação sobre a focagem e intensidade do feixe protões otimizando desta forma a transmissão do feixe que entra na câmara de reacções nucleares.

Neste trabalho utilizou-se alvo composto por um filme de NaF/Ag, pois este permite medir em simultâneo as reacções  $^{23}\text{Na}(p,p'\gamma)^{23}\text{Na}$  e  $^{19}\text{F}(p,p'\gamma)^{19}\text{F}$ .

As ressonâncias medidas neste trabalho estão bem definidas, com um passo em energia mais pequeno que o utilizado por Caciolli et al. [2]. A curva da secção eficaz medida neste trabalho, no intervalo de 2100 a 4040 keV, está sistematicamente acima da curva medida por Caciolli et al. [2] e apresenta um desvio em energia de aproximadamente 6 keV, em relação a este autor.

A secção eficaz obtida neste trabalho está concordante com secção eficaz de Mateus et al. [1], no intervalo de energias de 2100 keV a 2400 keV.

Os resultados obtidos neste trabalho sugerem que as discrepâncias nos resultados experimentais poderão dever-se a falhas no procedimento experimental de Caciolli et al. [2]. No entanto está a decorrer uma colaboração entre o nosso grupo e o grupo de Caciolli para tentar resolver esta discrepância.

Desta forma conclui-se que a secção eficaz da reacção nuclear  $^{23}\text{Na}(p,p'\gamma)^{23}\text{Na}$  correspondente à emissão de um fóton de 440 keV, foi correctamente medida e irá ser enviada para publicação num futuro próximo (em conjunto com os resultados referidos de seguida).

Através dos espectros colectados neste trabalho experimental está, neste momento, a ser determinada a secção eficaz da reacção nuclear  $^{23}\text{Na}(p,p'\gamma)^{23}\text{Na}$  correspondente à emissão de um fóton de 1640 keV, a secção eficaz da reacção nuclear  $^{19}\text{F}(p,p'\gamma)^{19}\text{F}$  correspondente à emissão de um fóton de 110 keV e de 197keV. Além disto também estão a ser analisados os espectros de partículas carregadas.

## 7. Referências bibliográficas

- [1] Cruz J, Jesus AP, Mateus R, Ribeiro JP. Measurement of the inelastic scattering of protons by  $^{23}\text{Na}$  in the energy range 1.25-2.40 MeV. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. 2004; 219 - 220: 307 - 311.
- [2] Caciolli A, Calzolari G, Chiari M, Climent-Font A, Fernández-Jiménez MT, García-López G, Lucarelli F, Nava S. Proton elastic scattering and proton induced  $\gamma$ -ray emission cross-sections on Na from 2 to 5 MeV. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. 2008; 266: 1392 - 1396.
- [3] Pierce TB, Peck PF, Henry WM, Hooton BW. The use of a lithium-drifted germanium diode to determine carbon in steels by measurement of prompt  $\gamma$ -radiation. *Analytica Chimica Acta*. 1965; 33: 586 - 592.
- [4] Pierce TB, Peck PF, Cuff DR. A. Application of inelastic proton scattering to the rapid determination of silicon in steels. *Analytica Chimica Acta*. 1967; 39: 433 - 436.
- [5] Borderie B, Barrandon JN. New analytical developments in prompt gamma-ray spectrometry with low-energy tritons and alpha particles B. *Nuclear Instruments and Methods*. November 1978; 156: 483-492.
- [6] Boni C, Cereda E, Marcazzan GMB, Tomasi V. Beam Interactions with Materials and Atoms. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B*. November 1988; 35: 80 - 86.
- [7] Mateus, R. Recolha Automática de aerossóis e a sua análise por técnicas analíticas nucleares. (Dissertação de Doutoramento). Lisboa: Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa; 2003.
- [8] Fonseca M. Análise de elementos leves por reacções Nucleares com produção de radiação gama. (Dissertação de Doutoramento). Lisboa: Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Nova de Lisboa; 2010.
- [9] Krane KS. *Introductory Nuclear Physics*. New York: John Wiley & Sons; 1987.
- [10] Endt PM, Leun C. Energy levels of  $A = 21-44$  nuclei (V). *Nuclear Physics A*. 1973; 214: 1 - 625.
- [11] Ziegler JF, Biersak JP, Littmark U. *The Stopping and Range of Ions in Solids*. New York: Pergamon Press; 2009.
- [12] Bocan J. *The Development of Time-of-flight Telescope for Elastic Recoil Detection Analysis*. (Master Thesis). Prague: Faculty of Nuclear Sciences and Physical Engineering, Department of Physics, Czech Technical University in Prague; 2007.
- [13] Júnior AJ, Amaral S, Silva CM, Menezes R, Bezerra JD. Estudo comparativo entre os detectores HPGe e NaI(Tl) na determinação de  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  e  $^{40}\text{K}$  em amostras de solo. *Scientia Plena*. 2009; 5(4).
- [14] Salvat F, Fernández-Varea JM, Sempau J. *PENELOPE-2006: a Code System for Monte Carlo Simulation of Electron and Photon Transport*. (Workshop Proceedings). Barcelona: Facultat de Física (ECM) de la Universitat de Barcelona; 2006.

- [15] Pinto JV. Calibração em eficiência de um detector de Ge(HP), Projecto e desenho da nova câmara de PIGE. (Relatório de Projecto Estágio). Lisboa: Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Nova de Lisboa.
- [16] SolidWorks Corporation.
- [17] Silva RC. Estudo por RBS e Canalização Iónica de Ligas de Mg, Al, e Fe, formadas por Implantação Iónica. (Tese de Doutoramento). Lisboa: Universidade Lisboa; 1993.
- [18] OriginLab Corporation.
- [19] Barradas NP, Jeynes C, Homewood KP, Sealy BJ, Milosavljevic M. Beam Interactions with Materials and Atoms. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. April 1998; 139: 235 - 238.
- [20] Jesus AP, Mateus R, Ribeiro JP. Quantitative analysis of light elements in thick samples by PIGE. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. 2004; 219 - 220: 519 - 523.
- [21] Braizinha B, Jesus AP, Ribeiro JP. Excitation function and cross-section of the reaction  $^{19}\text{F}(p,p'\gamma)^{19}\text{F}$ . *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. 2000; 161 - 163: 186 - 190.
- [22] Braizinha B, Cruz J, Jesus AP, Mateus R, Pinto JV, Ribeiro JP. Proton-induced  $\gamma$ -ray analysis of lithium in thick samples. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. 2002; 190: 117 - 121.
- [23] Jesus AP, Mateus R, Ribeiro JP. A code for quantitative analysis of light elements in thick samples by PIGE. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. 2005; 229: 302 - 308.
- [24] Caciolli A, Chiari M, Climent-Font A, Fernández-Jiménez MT, García-López G, Lucarelli F, Nava S, Zucchiati A. Measurements of  $\gamma$ -ray emission induced by protons on fluorine and lithium. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. 2006; 249: 98 - 100.
- [25] Climent-Font A, Pászti F, García G, Fernández-Jiménez MT, Agulló F. First measurements with the Madrid 5 MV tandem accelerator. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. 2004; 219 - 220: 400 - 404.
- [26] Geiger H, Marsden E. On a Diffuse Reflection of the alpha-Particles. *Proceedings of the Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences of London A*. July 1909; 82: 495 - 500.
- [27] Cruz J. Experimental study of proton induced nuclear reactions in  $^{6,7}\text{Li}$ . (Dissertação de Doutoramento). Lisboa: Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Nova de Lisboa; 2006.
- [28] Cubero AR. Structural and compositional characterization of wide bandgap semiconductor heterostructures by ion beam analysis. (Ph.D. thesis). Madrid: Universidad Autónoma de Madrid Departamento de Física Aplicada Centro de Micro-Análisis de Materiales; 2010.

- [29] Fernandes N. Automatização do controlo de uma linha de feixe de iões de um acelerador de partículas utilizando ferramentas de programação LabVIEW. (Dissertação de Mestrado). Lisboa: Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Nova de Lisboa; 2010.
- [30] Nastasi M, Tesmer JR. Handbook of Modern Ion Beam Materials Analysis. Pittsburgh: MRS-Materials Research Society; 1995.
- [31] Chu WK, Mayer JW, Nicolet MA. Backscattering spectrometry. New York: Academic Press; 1978.
- [32] Knoll GF. Radiation Detection and Measurement. (3ª ed). New York: John Wiley & Sons; 1999
- [33] Ziegler JF, Biersak JP, Littmark U. The Stopping and Range of Ions in Solids. Oxford: Pergamon Press; 1985
- [34] Rolfs CE, Rodney WS. Cauldrons in the Cosmos. Chicago: The University of Chicago; 1988.
- [35] Kuckuk TM. Física Nuclear. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian; 1993.
- [36] Tsoufanidis N. Measurement and Detection of Radiation. 2ª ed. Washington: Taylor & Francis; 1995.
- [37] Wong S. Introductory Nuclear Physics. 2ªed. *Toronto*: John Wiley & Sons, Inc; 1998.

# **ANEXOS**

# **ANEXO 1**

**Tabelas das Secções Eficazes Totais para**

**$^{23}\text{Na}(p,p'\gamma)^{23}\text{Na}$  - Risca de 440 keV**

**Tabela:** Secções eficazes totais medidas neste trabalho

$^{23}\text{Na}(p,p'\gamma)^{23}\text{Na}$ - Risca de 440 keV					
Energia (keV)	$\frac{d\sigma}{d\Omega}$ (barn)	$\delta \frac{d\sigma}{d\Omega}$ (barn)	Energia (keV)	$\frac{d\sigma}{d\Omega}$ (barn)	$\delta \frac{d\sigma}{d\Omega}$ (barn)
2141,6	0,0187	0,002	2331,1	0,0928	0,003
2141,6	0,0194	0,003	2333,0	0,0989	0,004
2170,9	0,0298	0,003	2335,0	0,0953	0,003
2170,9	0,0292	0,006	2336,9	0,0804	0,003
2190,4	0,0762	0,010	2333,0	0,1131	0,004
2200,2	0,1363	0,011	2331,1	0,0848	0,004
2204,1	0,1594	0,013	2340,8	0,0641	0,004
2208,0	0,1750	0,013	2342,8	0,0578	0,009
2211,9	0,1885	0,013	2352,6	0,0541	0,007
2215,8	0,1885	0,013	2362,3	0,0360	0,007
2219,7	0,1792	0,012	2372,1	0,0351	0,009
2223,6	0,1748	0,012	2381,9	0,0466	0,010
2227,5	0,1646	0,010	2391,6	0,0366	0,011
2231,4	0,1414	0,010	2400,4	0,0307	0,011
2233,4	0,1328	0,008	2411,2	0,0436	0,011
2245,1	0,1075	0,007	2420,9	0,0930	0,010
2254,9	0,0928	0,006	2422,9	0,0983	0,009
2264,7	0,0744	0,005	2424,9	0,1197	0,008
2274,4	0,0618	0,005	2426,8	0,1345	0,007
2284,2	0,0679	0,004	2415,1	0,0544	0,007
2288,1	0,0567	0,004	2428,8	0,1602	0,006
2297,9	0,0442	0,003	2430,7	0,1491	0,006
2307,6	0,0372	0,003	2432,7	0,1363	0,005
2317,4	0,0352	0,004	2434,6	0,1227	0,005
2327,2	0,0515	0,004	2436,6	0,1038	0,005
2331,1	0,0854	0,005	2438,5	0,0908	0,005
2336,0	0,0895	0,006	2440,5	0,0899	0,006
2338,9	0,0615	0,006	2442,4	0,0807	0,006
2342,8	0,0515	0,007	2444,4	0,0820	0,007
2346,7	0,0508	0,007	2448,3	0,0733	0,013
2350,6	0,0517	0,008	2454,2	0,0659	0,014
2413,1	0,0526	0,007	2463,9	0,0651	0,014
2417,0	0,1183	0,007	2427,8	0,1483	0,012
3411,4	0,0781	0,006	2473,7	0,0648	0,010
3421,2	0,0933	0,005	2483,5	0,1750	0,010
3431,0	0,0778	0,005	2493,2	0,1329	0,008
3431,0	0,0753	0,004	2477,6	0,0750	0,009
3440,7	0,0717	0,005	2479,6	0,0866	0,009
3450,5	0,0720	0,004	2481,5	0,1002	0,009
3460,3	0,0782	0,004	2485,4	0,1958	0,011
2327,2	0,0429	0,004	2487,4	0,1970	0,011
2329,1	0,0622	0,003	2489,3	0,1614	0,012

$^{23}\text{Na}(p,p'\gamma)^{23}\text{Na}$ - Risca de 440 keV					
Energia (keV)	$\frac{d\sigma}{d\Omega}$ (barn)	$\delta \frac{d\sigma}{d\Omega}$ (barn)	Energia (keV)	$\frac{d\sigma}{d\Omega}$ (barn)	$\delta \frac{d\sigma}{d\Omega}$ (barn)
2491,3	0,1364	0,013	2622,2	0,0499	0,005
2495,2	0,1167	0,013	2635,8	0,0500	0,005
2497,1	0,1207	0,015	2639,7	0,0546	0,006
2501,0	0,1295	0,017	2643,7	0,0533	0,006
2503,0	0,1295	0,018	2645,6	0,0532	0,006
2506,9	0,1489	0,018	2647,6	0,0555	0,006
2508,9	0,1592	0,017	2657,3	0,0736	0,007
2510,8	0,1686	0,018	2649,5	0,0562	0,007
2512,8	0,1842	0,017	2651,5	0,0590	0,007
2514,7	0,1865	0,017	2653,4	0,0606	0,008
2516,7	0,2041	0,015	2655,4	0,0653	0,009
2518,6	0,2411	0,014	2659,3	0,0763	0,010
2520,6	0,2546	0,014	2663,2	0,0765	0,011
2522,5	0,2561	0,012	2667,1	0,0857	0,012
2524,5	0,2461	0,010	2669,1	0,0894	0,012
2526,4	0,2506	0,009	2671,0	0,1018	0,011
2528,4	0,2450	0,008	2673,0	0,1006	0,010
2530,3	0,2408	0,006	2674,9	0,1109	0,009
2532,3	0,2165	0,005	2676,9	0,1198	0,008
2534,3	0,1998	0,005	2678,8	0,1349	0,006
2536,2	0,1901	0,004	2680,8	0,1493	0,005
2538,2	0,1629	0,005	2682,7	0,1607	0,005
2542,1	0,1413	0,008	2684,7	0,1666	0,004
2546,0	0,1245	0,007	2686,6	0,1563	0,004
2549,9	0,1087	0,006	2690,5	0,1356	0,004
2559,6	0,0812	0,005	2692,5	0,1251	0,004
2569,4	0,0589	0,004	2694,4	0,1091	0,003
2579,2	0,0648	0,004	2696,4	0,0876	0,004
2575,3	0,0485	0,004	2700,3	0,0661	0,004
2563,6	0,0614	0,004	2702,3	0,0614	0,004
2589,0	0,1092	0,004	2704,2	0,0562	0,006
2590,9	0,0920	0,004	2706,2	0,0532	0,008
2592,9	0,0876	0,004	2710,1	0,0473	0,010
2602,6	0,0629	0,004	2714,0	0,0450	0,010
2612,4	0,0577	0,004	2717,9	0,0415	0,008
2616,3	0,0558	0,004	2721,8	0,0426	0,007
2612,4	0,0572	0,004	2731,6	0,0438	0,006
2614,3	0,0519	0,004	2741,3	0,0525	0,006
2620,2	0,0502	0,004	2751,1	0,1344	0,005
2631,9	0,0515	0,004	2747,2	0,0741	0,005
2633,9	0,0504	0,004	2749,1	0,1079	0,005
2624,1	0,0503	0,004	2753,1	0,1328	0,004
2628,0	0,0505	0,005	2755,0	0,1119	0,005

$^{23}\text{Na}(p,p'\gamma)^{23}\text{Na}$ - Risca de 440 keV					
Energia (keV)	$\frac{d\sigma}{d\Omega}$ (barn)	$\delta \frac{d\sigma}{d\Omega}$ (barn)	Energia (keV)	$\frac{d\sigma}{d\Omega}$ (barn)	$\delta \frac{d\sigma}{d\Omega}$ (barn)
2757,0	0,0983	0,005	2971,9	0,0708	0,014
2758,9	0,0870	0,005	2981,6	0,0839	0,014
2760,9	0,0769	0,004	2991,4	0,1052	0,014
2764,8	0,0643	0,004	2985,5	0,0850	0,014
2768,7	0,0619	0,004	2977,7	0,0834	0,015
2770,6	0,0603	0,004	3001,2	0,1573	0,015
2772,6	0,0567	0,005	2995,3	0,1298	0,015
2775,5	0,0589	0,005	3003,1	0,1701	0,014
2776,5	0,0599	0,006	3007,0	0,1937	0,015
2778,5	0,0609	0,006	3009,0	0,1984	0,015
2780,4	0,0579	0,006	3010,9	0,2002	0,016
2784,3	0,0549	0,007	3012,9	0,1986	0,016
2786,3	0,0571	0,008	3016,8	0,2078	0,017
2788,2	0,0573	0,009	3020,7	0,2067	0,016
2790,2	0,0587	0,009	3022,7	0,2028	0,015
2796,0	0,0640	0,011	3026,6	0,2003	0,012
2799,9	0,0735	0,012	3030,5	0,2129	0,012
2803,8	0,0794	0,012	3032,4	0,2040	0,011
2807,8	0,0763	0,015	3036,3	0,2247	0,011
2815,6	0,0910	0,026	3040,2	0,2225	0,010
2819,5	0,1047	0,028	3044,1	0,2437	0,010
2823,4	0,1188	0,026	3048,0	0,2216	0,009
2827,3	0,1311	0,021	3050,0	0,2130	0,009
2831,2	0,1513	0,019	3053,9	0,1713	0,010
2835,1	0,1614	0,017	3055,9	0,1614	0,010
2838,0	0,1702	0,013	3059,8	0,1521	0,010
2842,9	0,2149	0,011	3063,7	0,1513	0,010
2846,8	0,3669	0,009	3068,6	0,1428	0,012
2850,7	0,3689	0,007	3079,3	0,1313	0,013
2854,6	0,2943	0,007	3089,1	0,1267	0,014
2848,8	0,3908	0,006	3098,8	0,1283	0,016
2858,5	0,2664	0,006	3108,6	0,1390	0,016
2862,5	0,2454	0,005	3108,6	0,1338	0,015
2875,2	0,1781	0,005	3112,5	0,1325	0,016
2883,9	0,1489	0,005	3116,4	0,1386	0,015
2893,7	0,1213	0,005	3126,2	0,1634	0,015
2903,5	0,0939	0,006	3130,1	0,1760	0,014
2913,3	0,0943	0,006	3134,0	0,1903	0,013
2924,0	0,0824	0,006	3139,9	0,2173	0,012
2932,8	0,0781	0,008	3143,8	0,2179	0,012
2942,6	0,0713	0,009	3145,7	0,2151	0,011
2952,3	0,0669	0,011	3147,7	0,2178	0,008
2962,1	0,0725	0,012	3151,6	0,2050	0,008

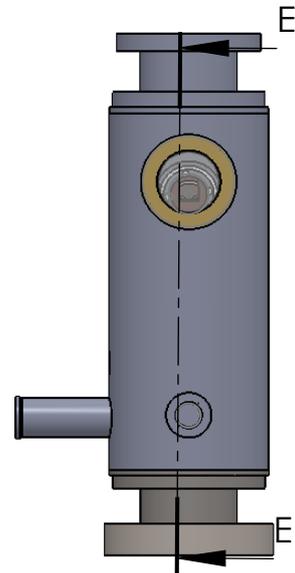
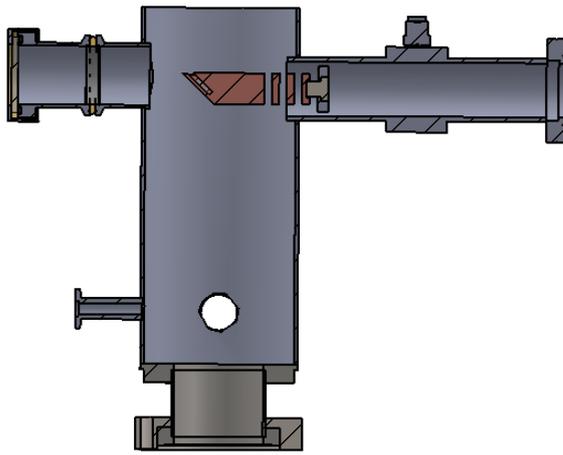
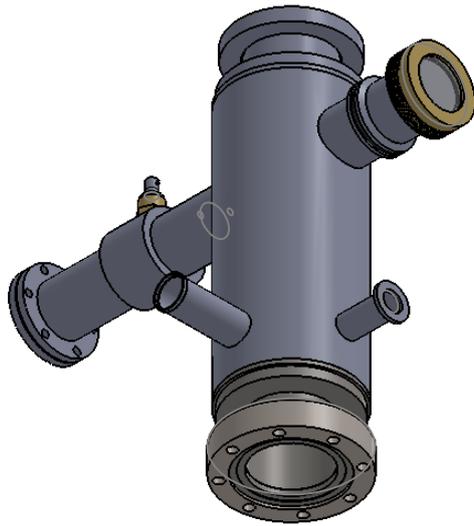
$^{23}\text{Na}(p,p'\gamma)^{23}\text{Na}$ - Risca de 440 keV					
Energia (keV)	$\frac{d\sigma}{d\Omega}$ (barn)	$\delta \frac{d\sigma}{d\Omega}$ (barn)	Energia (keV)	$\frac{d\sigma}{d\Omega}$ (barn)	$\delta \frac{d\sigma}{d\Omega}$ (barn)
3153,5	0,2084	0,006	3499,3	0,0797	0,007
3157,5	0,1904	0,006	3509,1	0,0909	0,007
3161,4	0,1798	0,006	3518,9	0,0989	0,008
3165,3	0,1711	0,005	3528,6	0,1118	0,009
3169,2	0,1600	0,007	3538,4	0,1292	0,011
3173,1	0,1484	0,005	3548,2	0,1459	0,011
3182,8	0,1102	0,005	3557,9	0,1508	0,013
3192,6	0,1017	0,005	3577,5	0,1788	0,013
3202,4	0,0858	0,005	3573,6	0,1802	0,013
3212,2	0,0841	0,005	3563,8	0,1822	0,012
3221,9	0,0772	0,006	3583,3	0,1636	0,014
3231,7	0,0683	0,007	3587,2	0,1963	0,014
3241,5	0,0867	0,006	3591,1	0,2082	0,015
3251,2	0,0636	0,006	3585,3	0,1939	0,015
3245,4	0,0688	0,006	3597,0	0,2123	0,014
3261,0	0,0616	0,005	3605,8	0,1922	0,012
3270,8	0,0604	0,006	3616,5	0,1663	0,011
3280,5	0,0695	0,005	3626,3	0,1550	0,010
3284,4	0,0844	0,004	3636,1	0,1310	0,009
3288,3	0,0897	0,005	3645,9	0,1178	0,007
3292,2	0,0859	0,008	3655,6	0,0930	0,007
3296,2	0,0756	0,010	3665,4	0,0886	0,007
3296,2	0,0796	0,011	3676,1	0,0913	0,007
3300,1	0,0693	0,010	3684,9	0,0964	0,007
3304,0	0,0727	0,008	3695,7	0,1005	0,008
3313,7	0,0616	0,006	3704,5	0,1028	0,008
3323,5	0,0534	0,005	3714,2	0,1139	0,009
3333,3	0,0605	0,005	3724,0	0,1267	0,010
3343,0	0,1029	0,005	3733,8	0,1390	0,012
3346,9	0,1448	0,005	3743,5	0,1623	0,013
3350,9	0,1414	0,005	3763,1	0,1947	0,014
3348,9	0,1580	0,006	3774,8	0,1487	0,014
3354,8	0,1128	0,007	3782,6	0,1066	0,014
3362,6	0,0779	0,006	3757,2	0,1871	0,013
3372,3	0,0640	0,006	3759,2	0,1931	0,012
3382,1	0,0609	0,005	3761,1	0,1903	0,011
3391,9	0,0599	0,005	3765,0	0,1868	0,009
3401,7	0,0627	0,006	3768,9	0,1710	0,008
3411,4	0,0694	0,006	3778,7	0,1267	0,007
3460,3	0,0782	0,006	3791,4	0,0965	0,008
3470,0	0,0822	0,006	3802,1	0,1153	0,009
3479,8	0,0750	0,006	3811,9	0,1279	0,010
3489,6	0,0767	0,006	3821,7	0,1371	0,010

**$^{23}\text{Na}(p,p'\gamma)^{23}\text{Na}$  - Risca de 440 keV**

<b>Energia (keV)</b>	<b><math>\frac{d\sigma}{d\Omega}</math> (barn)</b>	<b><math>\delta \frac{d\sigma}{d\Omega}</math> (barn)</b>
3831,4	0,1349	0,010
3841,2	0,1308	0,009
3851,0	0,1256	0,009
3860,7	0,1196	0,009
3870,5	0,1205	0,009
3880,3	0,1249	0,010
3890,1	0,1420	0,011
3899,8	0,1584	0,011
3909,6	0,1567	0,010
3919,4	0,1390	0,009
3929,1	0,1222	0,009
3938,9	0,1183	0,009
3948,7	0,1210	0,009
3958,4	0,1390	0,010
3952,6	0,1242	0,012
3968,2	0,1619	0,014
3978,0	0,1918	0,014
3987,7	0,2102	0,015
3981,9	0,1967	0,016
3987,7	0,2170	0,016
3997,5	0,2215	0,016
4007,3	0,2280	0,016
4001,4	0,2219	0,015
4017,0	0,2149	0,016
4026,8	0,2002	0,015
4019,0	0,2191	0,015
4022,9	0,2150	0,014
4024,8	0,2147	0,015
4028,8	0,2060	0,015
4032,7	0,2131	0,015
4036,6	0,2144	0,017
4040,5	0,2344	0,002

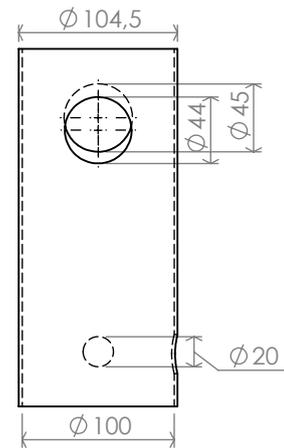
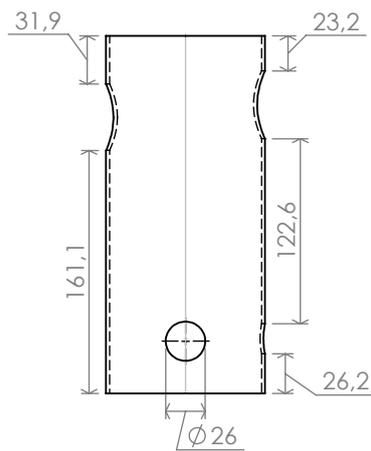
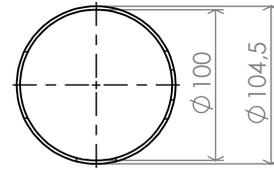
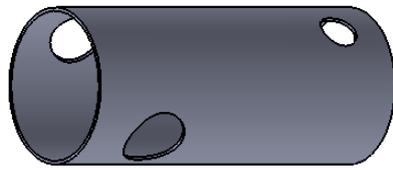
# **ANEXO 2**

**Desenhos Técnicos das Peças que Compõem  
o Sistema Visor/Medidor De Intensidade De  
Feixe**

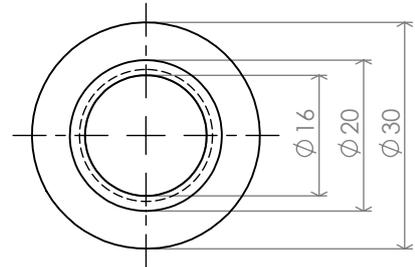
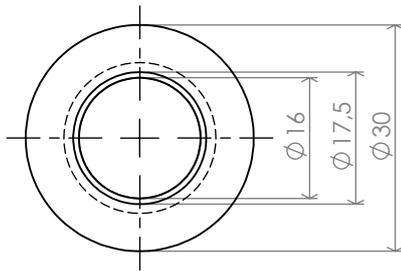
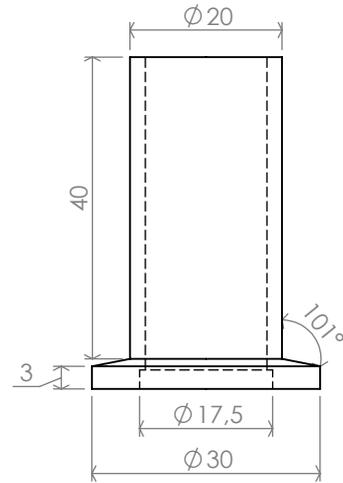
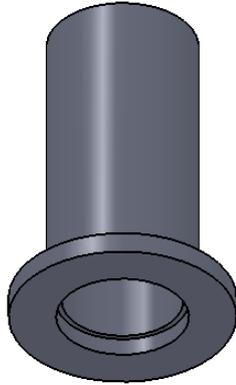


SECTION E-E

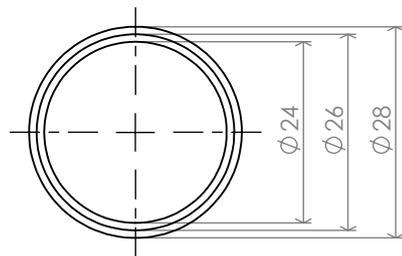
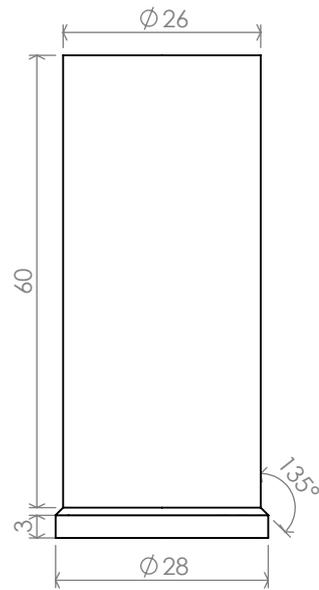
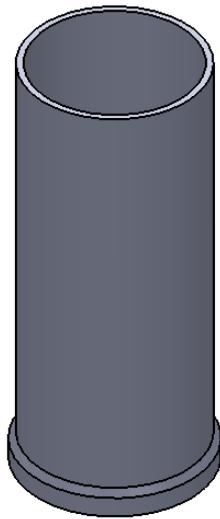
Nº	DESIGNAÇÃO	Nº DA NORMA Nº DC DESENHO	MATERIAL	Nº Ref	PRODUTO SEMI ACABADO Nº DO MOLDE Nº DA MATRIZ	PESO	OBSERVAÇÕES
Projectou	Filipa Lourenço		<b>SISTEMA VISOR/MEDIDOR DE FEIXE</b>				<b>ITN / FCT - UNL</b>
Desenhou	Filipa Lourenço						
Copiou							
Verificou							
Escalas 1:5							
Tolerância +/- 0,1							



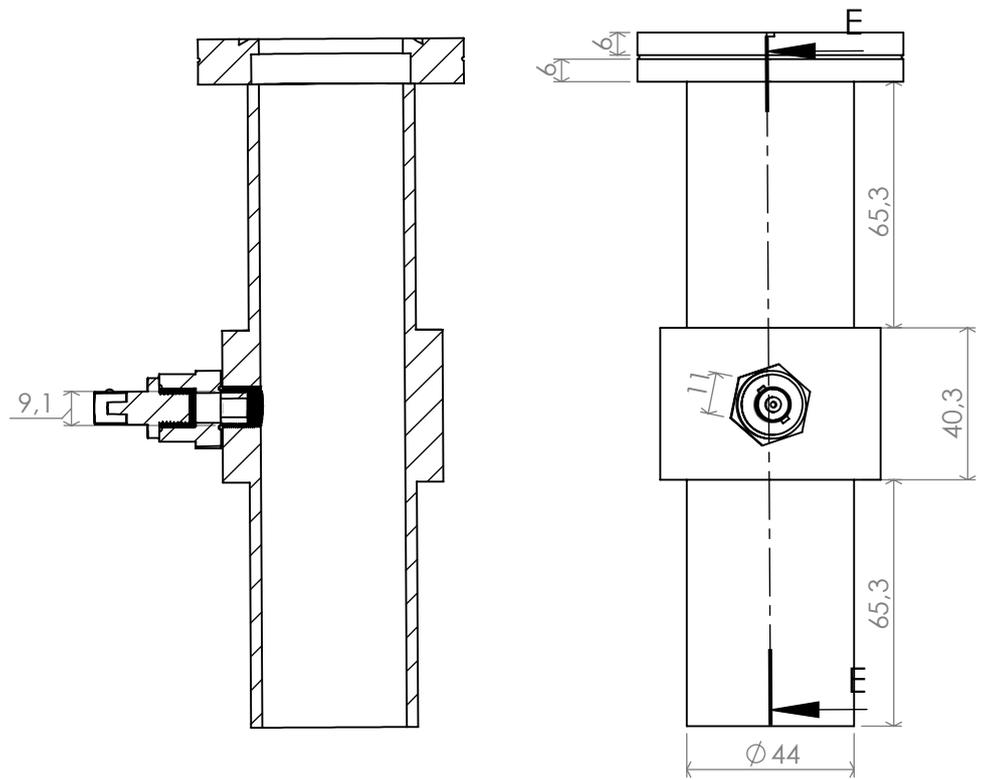
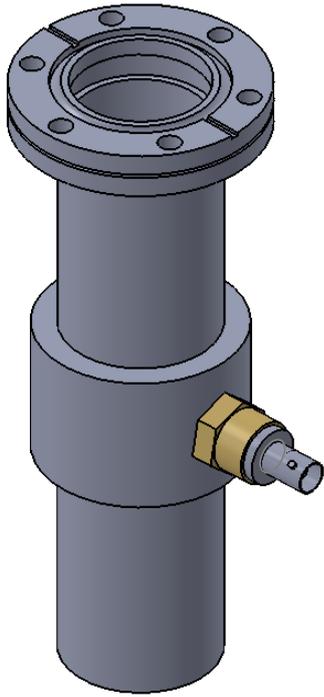
1	Tubo Principal		Aço	304			
Nº	DESIGNAÇÃO	Nº DA NORMA Nº DC DESENHO	MATERIAL	Nº Ref	PRODUTO SEMI ACABADO Nº DO MOLDE Nº DA MATRIZ	PESO	OBSERVAÇÕES
Projectou	Filipa Lourenço	<b>SISTEMA VISOR/MEDIDOR DE FEIXE</b>  Tubo Principal				ITN / FCT - UNL	
Desenhou	Filipa Lourenço						
Copiou							
Verificou							
Escala 1:5							
Tolerância +/- 0,1							



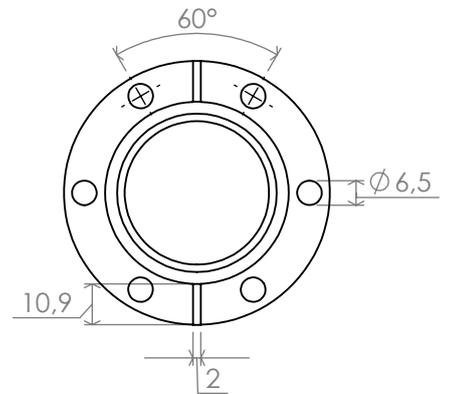
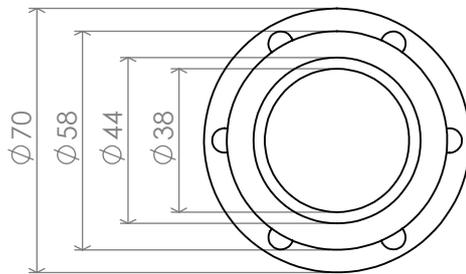
1	KF16		Aço	304											
Nº	DESIGNAÇÃO	Nº DA NORMA Nº DC DESENHO	MATERIAL	Nº Ref	PRODUTO SEMI ACABADO Nº DO MOLDE Nº DA MATRIZ	PESO	OBSERVAÇÕES								
Projectou	Filipa Lourenço	<b>SISTEMA VISOR/MEDIDOR DE FEIXE</b>			<b>ITN / FCT - UNL</b>										
Desenhou	Filipa Lourenço														
Copiou															
Verificou															
Escala 1:1		<b>KF16</b>			<table border="1" style="width: 100%; height: 20px;"> <tr> <td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td> </tr> </table>										
Tolerância +/- 0,1															



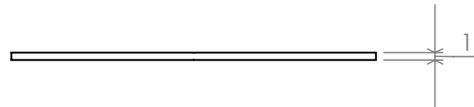
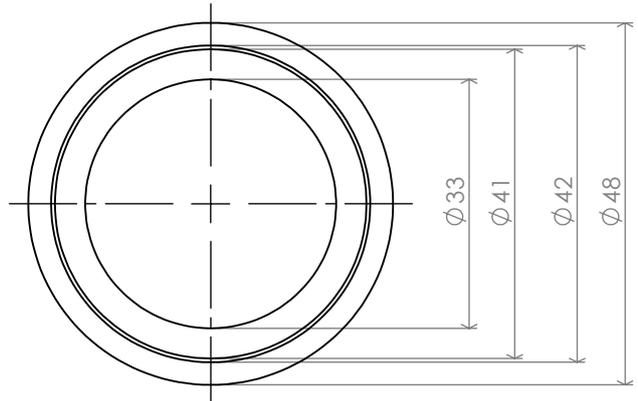
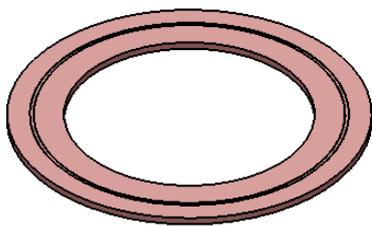
1	KF 25		Aço	304											
Nº	DESIGNAÇÃO	Nº DA NORMA Nº DC DESENHO	MATERIAL	Nº Ref	PRODUTO SEMI ACABADO Nº DO MOLDE Nº DA MATRIZ	PESO	OBSERVAÇÕES								
Projectou	Filipa Lourenço	<b>SISTEMA DE MEDIÇÃO E ALINHAMENTO DO FEIXE</b>				<b>ITN / FCT - UNL</b>									
Desenhou	Filipa Lourenço														
Copiou															
Verificou															
Escala 1:1		<b>KF25</b>				<table border="1" style="width: 100%; height: 20px;"> <tr> <td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td> </tr> </table>									
Tolerância +/- 0,1															



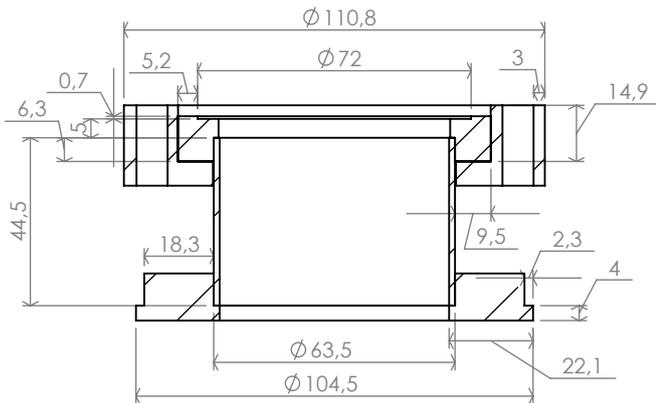
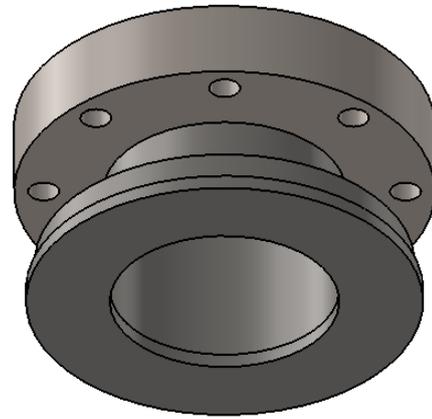
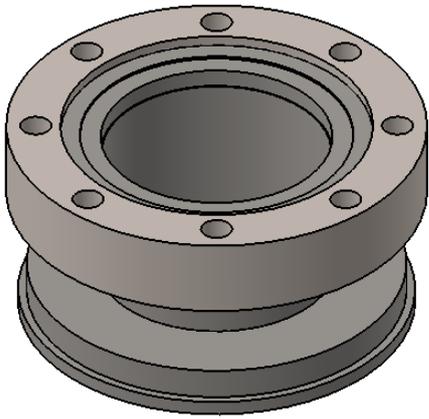
SECTION E-E



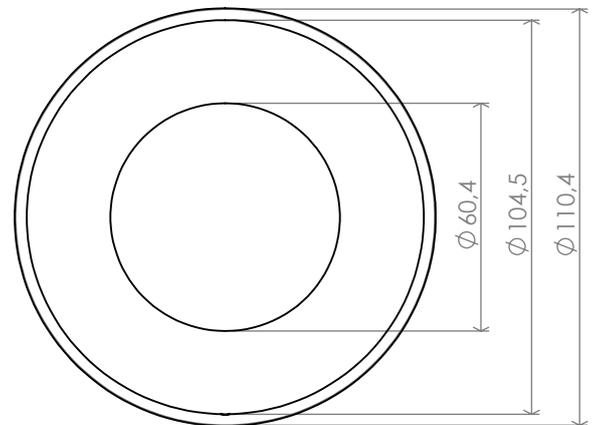
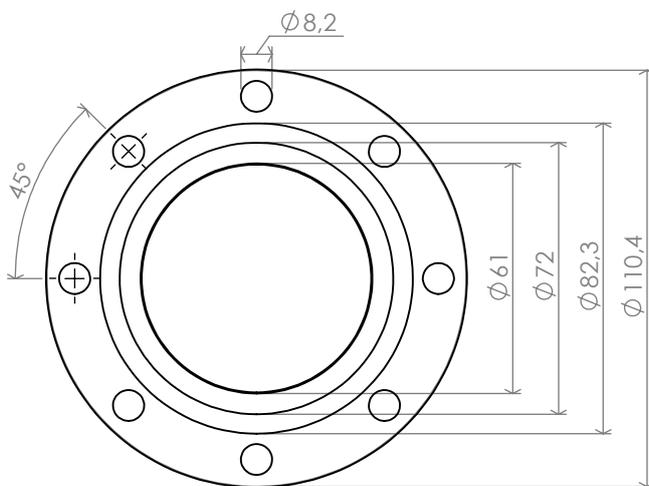
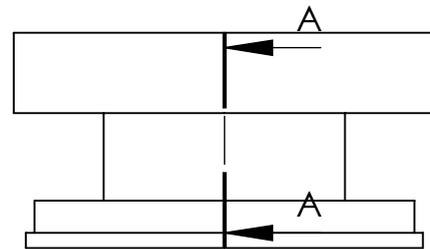
1	Tubo		Aço	304				
	Anel		Aço	304				
	BNC		Brze					
Nº	DESIGNAÇÃO	Nº DA NORMA Nº DC DESENHO	MATERIAL	Nº Ref	PRODUTO SEMI ACABADO Nº DO MOLDE Nº DA MATRIZ	PESO	OBSERVAÇÕES	
Projectou	Filipa Lourenço		<b>SISTEMA VISOR/MEDIDOR DE FEIXE</b>  Tubo de Ligação ao Bellow				ITN / FCT - UNL	
Desenhou	Filipa Lourenço							
Copiou								
Verificou								
Escalas 1:2								
Tolerância +/- 0,1								



1	Oring		Cobre				
Nº	DESIGNAÇÃO	Nº DA NORMA Nº DC DESENHO	MATERIAL	Nº Ref	PRODUTO SEMI ACABADO Nº DO MOLDE Nº DA MATRIZ	PESO	OBSERVAÇÕES
Projectou	Filipa Lourenço	<p style="text-align: center;"><b>SISTEMA VISOR/MEDIDOR DE FEIXE</b></p>				ITN / FCT - UNL	
Desenhou	Filipa Lourenço						
Copiou							
Verificou							
Escala 1:1		<p style="text-align: center;">Tubo de Ligação ao Bellow</p>					
Tolerância +/- 0,1							

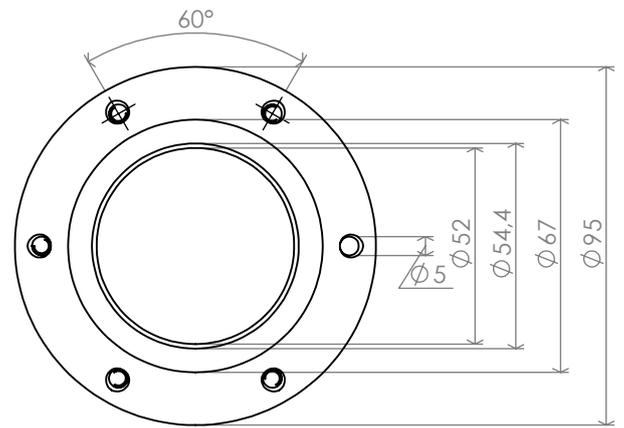
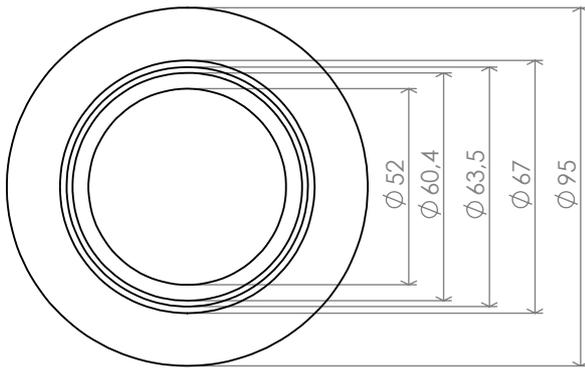
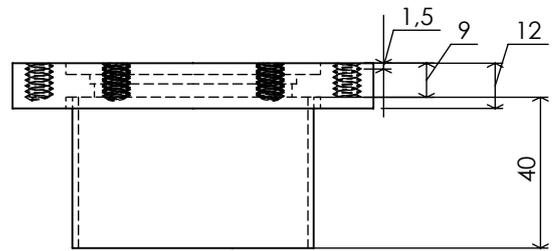
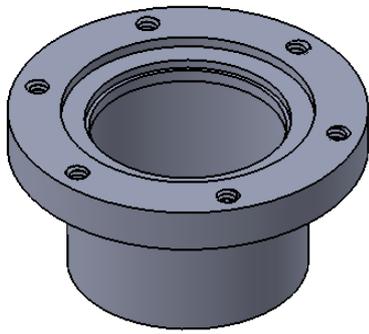


SECTION A-A

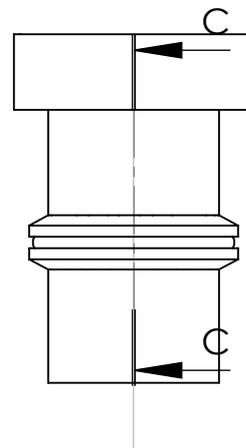
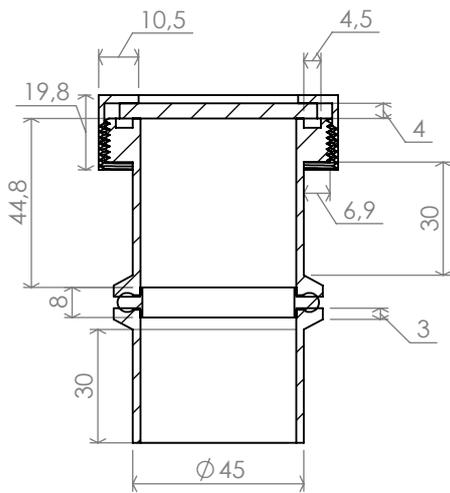
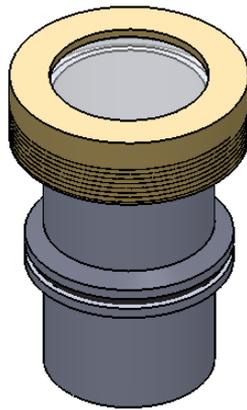


1	DN Flange		Aço	304			
2	Tubo		Aço	304			
3	CF 60 Rotativa		Aço	304			
Nº	DESIGNAÇÃO	Nº DA NORMA Nº DC DESENHO	MATERIAL	Nº Ref	PRODUTO SEMI ACABADO Nº DO MOLDE Nº DA MATRIZ	PESO	OBSERVAÇÕES

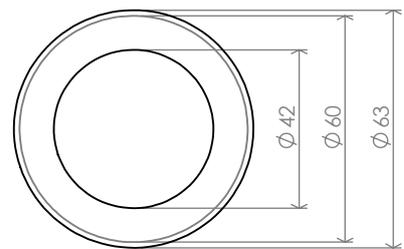
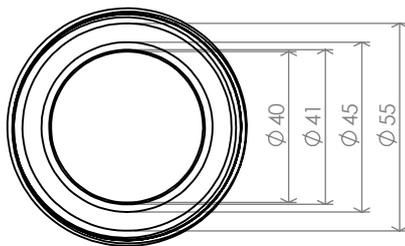
Projectou	Filipa Lourenço	<b>SISTEMA VISOR/MEDIDOR DE FEIXE</b>	<b>ITN / FCT - UNL</b>
Desenhou	Filipa Lourenço		
Copiou			
Verificou			
Escala 1:2		Primeira Redução no Sentido do Feixe	
Tolerância +/- 0,1			



1	Tubo		Aço	304											
2	Anel		Aço	304											
Nº	DESIGNAÇÃO	Nº DA NORMA Nº DC DESENHO	MATERIAL	Nº Ref	PRODUTO SEMI ACABADO Nº DO MOLDE Nº DA MATRIZ	PESO	OBSERVAÇÕES								
Projectou	Filipa Lourenço	<b>SISTEMA VISOR/MEDIDOR DE FEIXE</b>				<b>ITN / FCT - UNL</b>									
Desenhou	Filipa Lourenço														
Copiou															
Verificou															
Escala 1:2		<b>Segunda Redução no Sentido do Feixe</b>				<table border="1" style="width: 100%; height: 20px;"> <tr> <td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td> </tr> </table>									
Tolerância +/- 0,1															

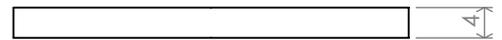
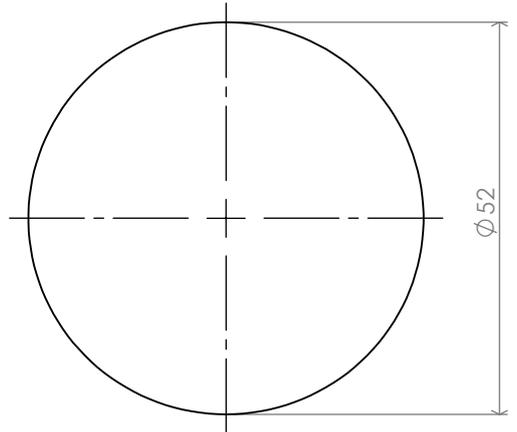
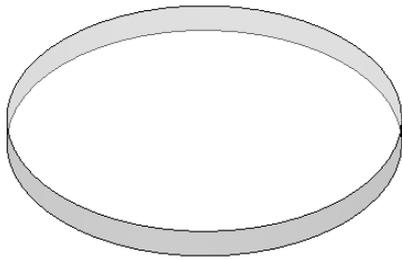


SECTION C-C

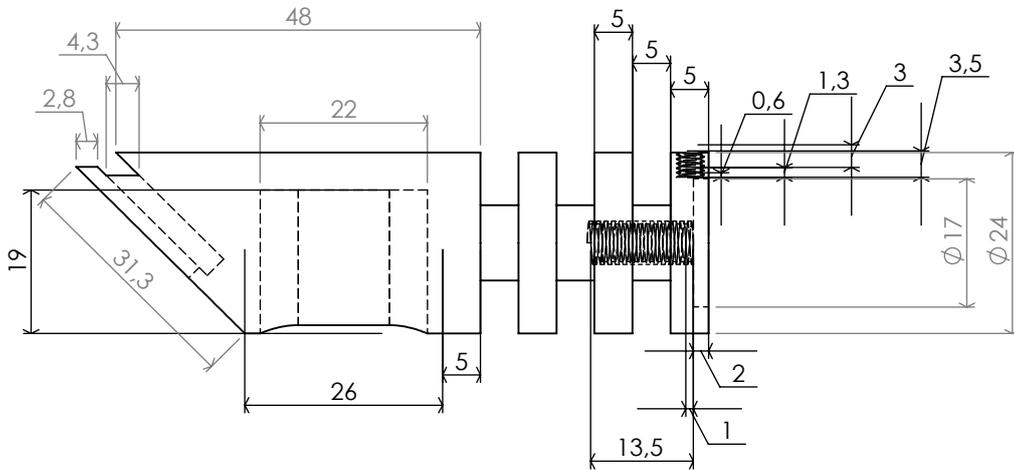
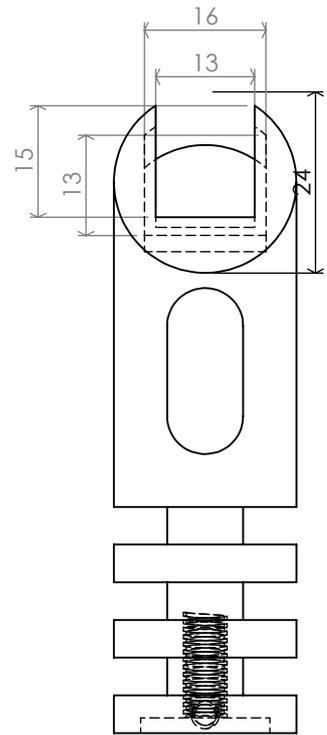
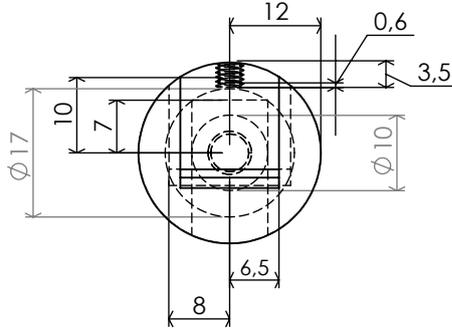
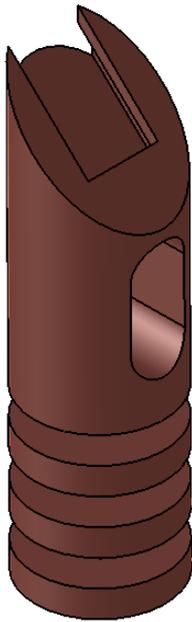


1	KF 40		Aço	304			
2	Tubo com rosca		Aço	304			
3	Tampa		Bronze				
Nº	DESIGNAÇÃO	MATERIAL	Nº DA NORMA Nº DC DESENHO	Nº Ref	PRODUTO SEMI ACABADO Nº DO MOLDE Nº DA MATRIZ	PESO	OBSERVAÇÕES

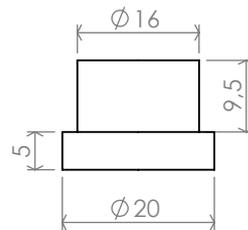
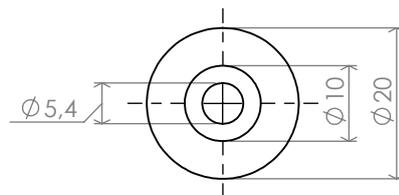
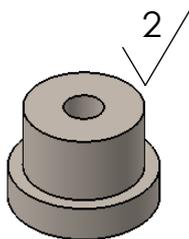
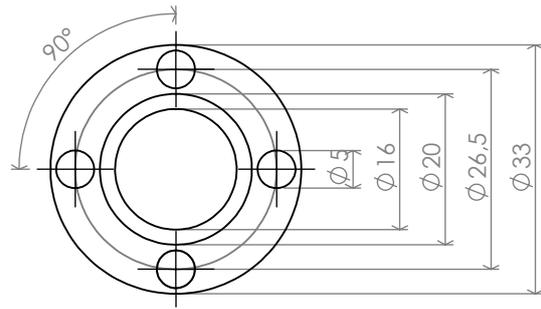
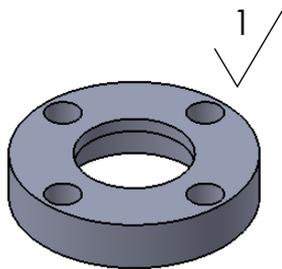
Projectou	Filipa Lourenço	<b>SISTEMA VISOR/MEDIDOR DE FEIXE</b>	<b>ITN / FCT - UNL</b>
Desenhou	Filipa Lourenço		
Copiou			
Verificou			
Escala 1:2		<b>Tubo Visor</b>	
Tolerância +/- 0,1			



1	Vidro			Vidro												
Nº	DESIGNAÇÃO		Nº DA NORMA Nº DC DESENHO	MATERIAL	Nº Ref	PRODUTO SEMI ACABADO Nº DO MOLDE Nº DA MATRIZ	PESO	OBSERVAÇÕES								
Projectou	Filipa Lourenço		<b>SISTEMA VISOR/MEDIDOR DE FEIXE</b>				<b>ITN / FCT - UNL</b>									
Desenhou	Filipa Lourenço															
Copiou																
Verificou																
Escala 1:1			<b>Tubo Visor</b>				<table border="1" style="width: 100%; height: 20px;"> <tr> <td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td> </tr> </table>									
Tolerância +/- 0,1																



1	Gaiola de Faraday		Cobre												
Nº	DESIGNAÇÃO	Nº DA NORMA Nº DC DESENHO	MATERIAL	Nº Ref	PRODUTO SEMI ACABADO Nº DO MOLDE Nº DA MATRIZ	PESO	OBSERVAÇÕES								
Projectou	Filipa Lourenço	<b>SISTEMA VISOR/MEDIDOR DE FEIXE</b>				<b>ITN / FCT - UNL</b>									
Desenhou	Filipa Lourenço														
Copiou															
Verificou															
Escala 1:1		<b>Gaiola de Faraday</b>				<table border="1" style="width: 100%; height: 20px;"> <tr> <td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td> </tr> </table>									
Tolerância +/- 0,1															



1	Anel		Aço	304											
2	Suporte		Macor												
Nº	DESIGNAÇÃO	Nº DA NORMA Nº DC DESENHO	MATERIAL	Nº Ref	PRODUTO SEMI ACABADO Nº DO MOLDE Nº DA MATRIZ	PESO	OBSERVAÇÕES								
Projectou	Filipa Lourenço	<b>SISTEMA VISOR/MEDIDOR DE FEIXE</b>				<b>ITN / FCT - UNL</b>									
Desenhou	Filipa Lourenço														
Copiou															
Verificou															
Escala 1:1		<b>Gaiola de Faraday</b>				<table border="1" style="width: 100%; height: 20px;"> <tr> <td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td> </tr> </table>									
Tolerância +/- 0,1															