

3

Apresentação dos resultados

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos neste trabalho. Foram medidas seções de choque parciais para cada fragmento positivamente carregado resultante da colisão da molécula de vapor d'água com He^+ . Seções de choque totais foram determinadas por meio da soma de todas as seções de choque parciais. As energias em que foram feitas as medidas são 1,0, 1,5 e 2,0 MeV.

3.1

Espectros TOF

Nas figuras 3.1 a 3.7 são apresentados os espectros de tempo de vôo obtidos em coincidência com o estado de carga final do projétil para cada energia. Nas figuras 3.1 a 3.3 estão apresentados os espectros de tempo de vôo a 1,0 MeV, nas figuras 3.4 e 3.5 os espectros a 1,5 MeV e, por fim, as figuras 3.6 e 3.7 os espectros a 2,0 MeV. Os picos exibidos são, da esquerda para a direita, H^+ , O^+ , OH^+ e H_2O^+ , respectivamente. Integrando o número de contagens exibidos em cada um, foram obtidos os dados com os quais foram calculadas as seções de choque apresentadas nas tabelas do apêndice E.

3.2

Seções de choque

Em seguida, são apresentadas as seções de choque medidas, em função da velocidade, para fins de comparação. O único trabalho semelhante apresenta seções de choque de ionização, perda e captura na faixa de energia de 5 até 450 keV [14] (figura 3.9). Os outros trabalhos utilizaram prótons como projéteis e, por isso, a comparação por velocidades (figura 3.8).

Na figura 3.8, os dados absolutos obtidos utilizando prótons (símbolos sem cor) como projéteis são comparados com os obtidos com He^+ (este trabalho, em vermelho), para o canal de ionização. Pode-se notar que existem semelhanças entre os dados obtidos com prótons e He^+ de mesma velocidade. Porém, diferenças também podem ser notadas. Mais claramente, pode-se perceber uma alteração na seção de choque para produção de fragmentos O^+

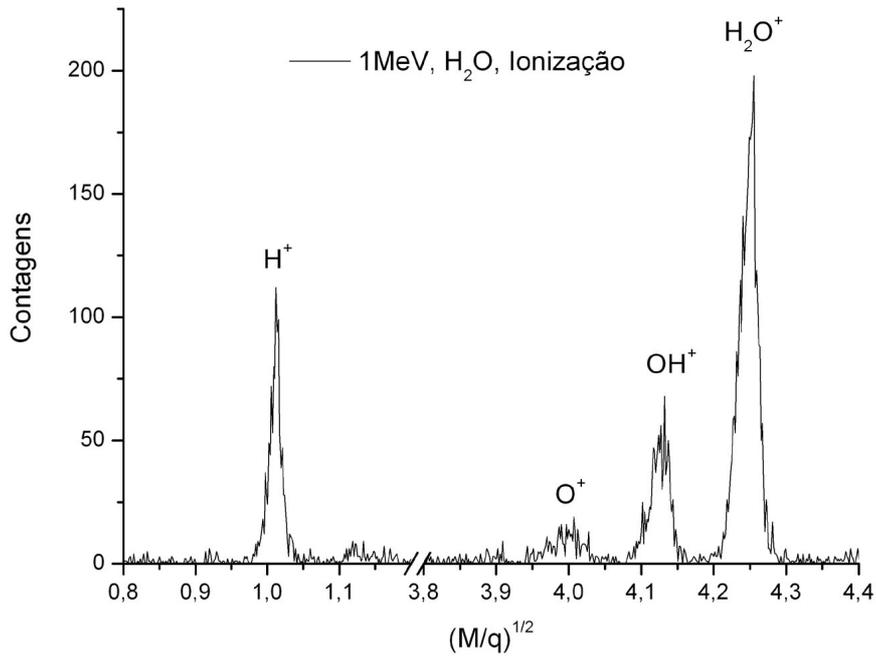


Figura 3.1: Espectro de tempo de vôo. 1 MeV, ionização

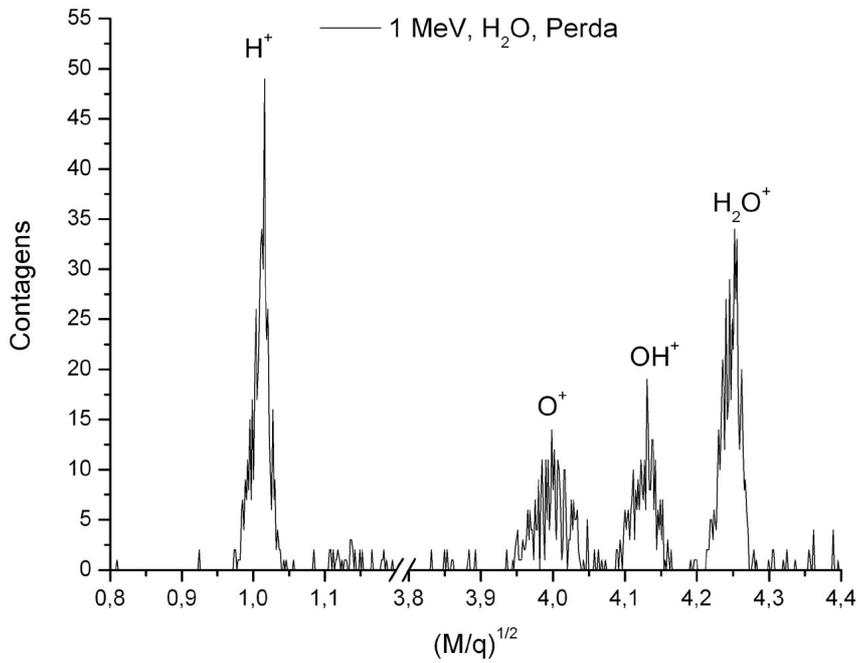


Figura 3.2: Espectro de tempo de vôo. 1 MeV, perda eletrônica

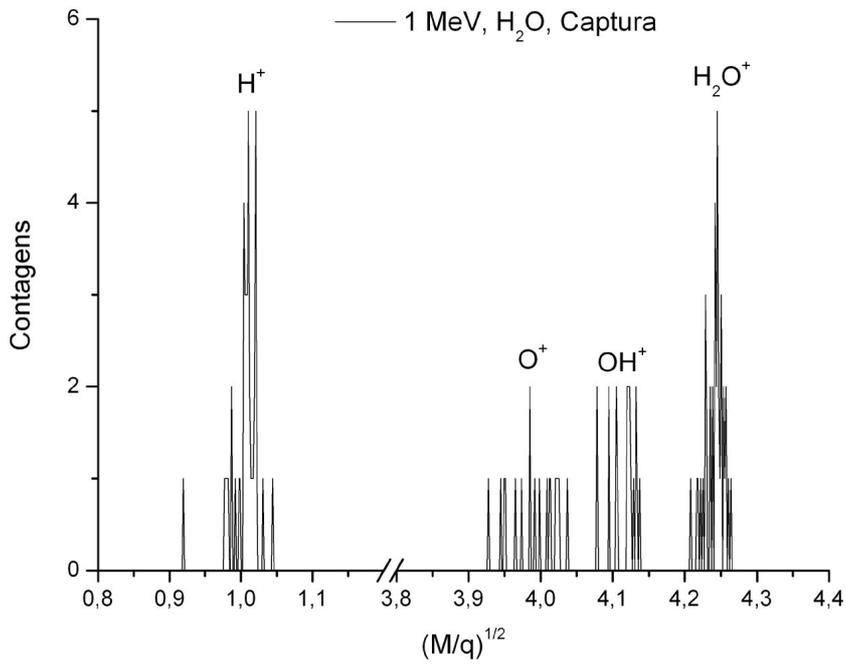


Figura 3.3: Espectro de tempo de voo. 1 MeV, captura eletrônica

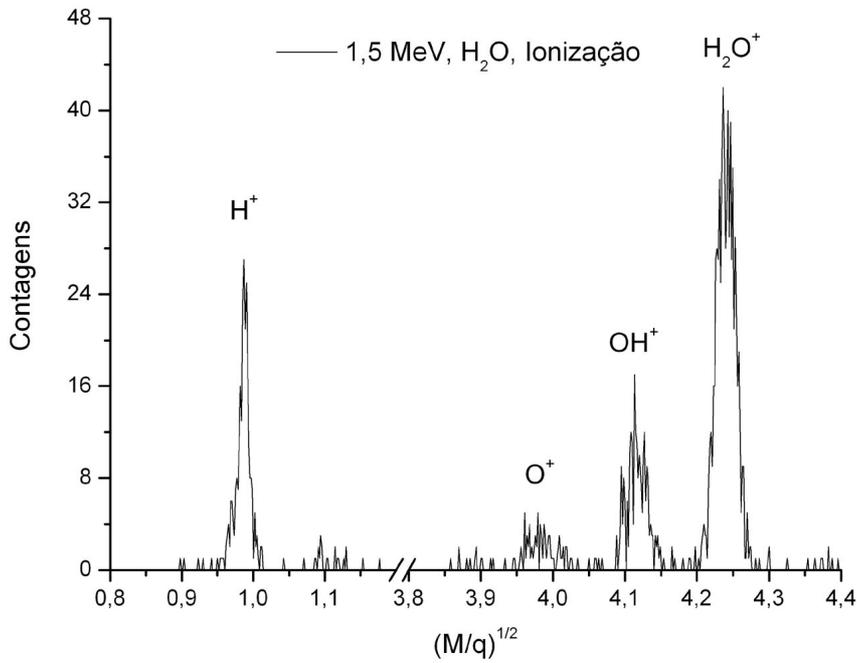


Figura 3.4: Espectro de tempo de voo. 1,5 MeV, ionização

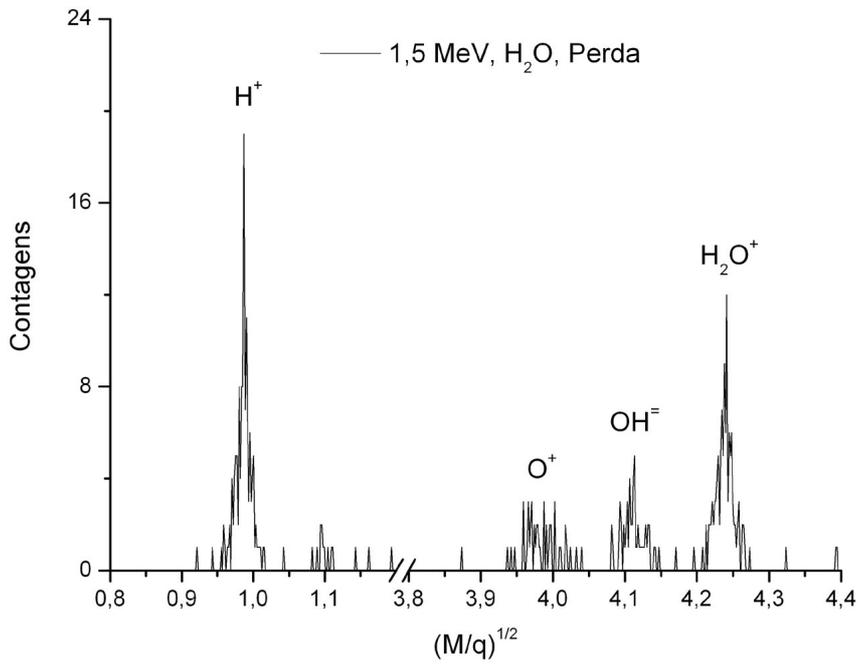


Figura 3.5: Espectro de tempo de vôo. 1,5 MeV, perda eletrônica

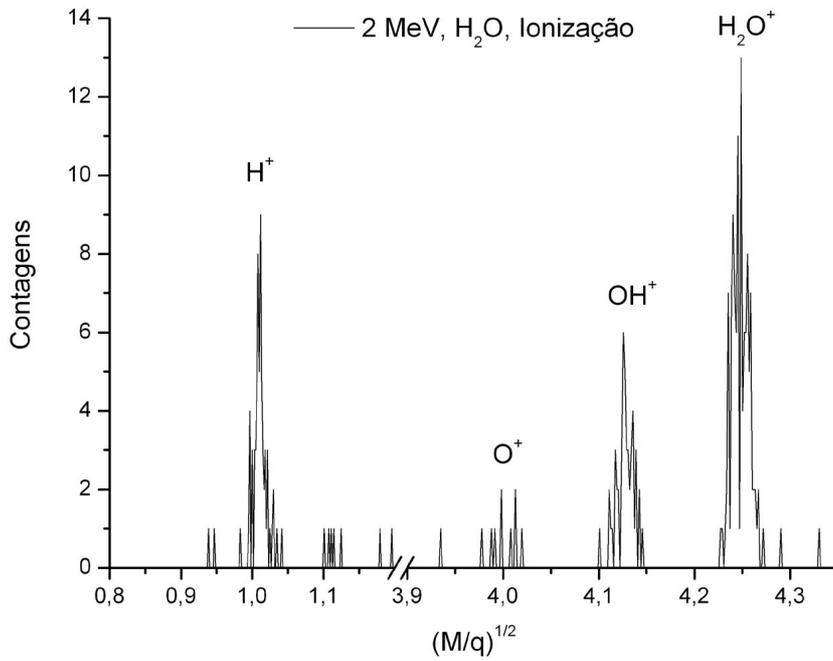


Figura 3.6: Espectro de tempo de vôo: 2 MeV, ionização

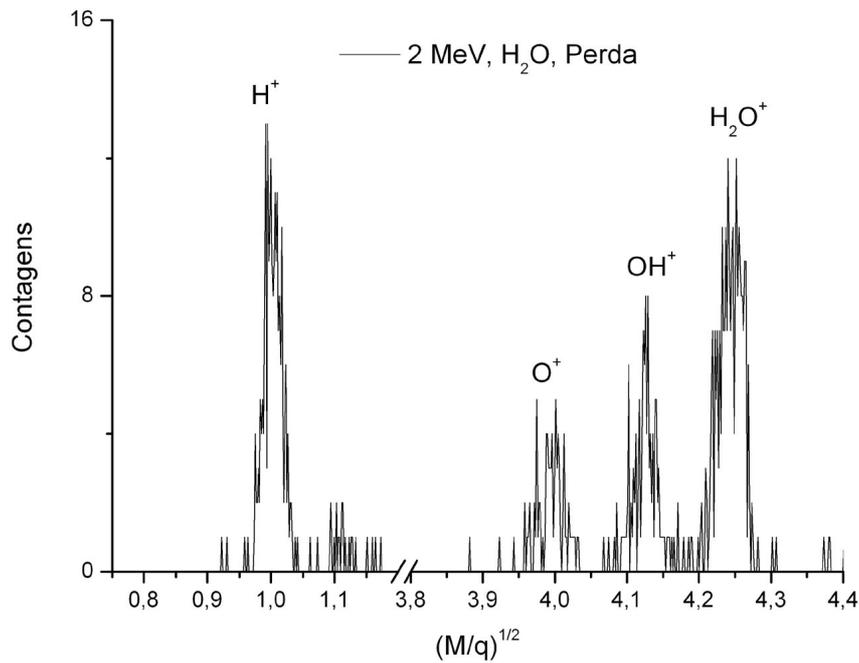


Figura 3.7: Espectro de tempo de vôo. 2 MeV, perda eletrônica

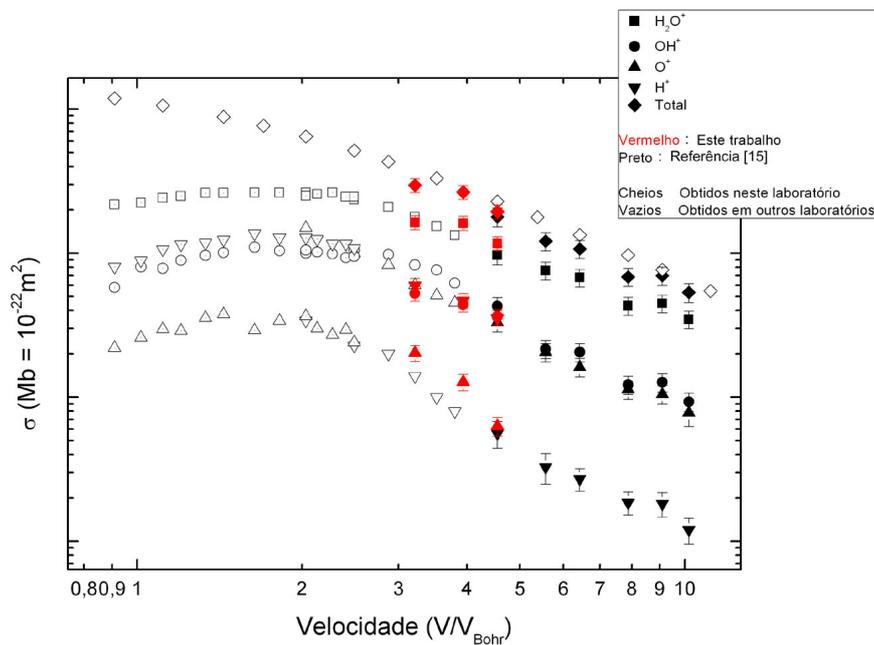


Figura 3.8: Seções de choque de ionização da molécula de vapor d'água por He^+ (este trabalho, em vermelho) e por prótons (vazios [12], com ponto no meio [13]), em função da velocidade. Quadrados para H_2O^+ , círculos para OH^+ , triângulos para O^+ , triângulos invertidos para H^+ e losangos para seções de choque totais. Símbolos cheios representam dados medidos no laboratório VDG da PUC-Rio.

em todas as energias. Este aumento diferenciado na produção do fragmento específico dá indício de que, para o canal de liberação de oxigênio, o tipo de projétil é relevante, mas em termos gerais, para o canal de ionização, o He^+ se comporta, essencialmente, como uma partícula de carga +1. Isso está relacionado com o fato de que a ionização é um processo importante em colisões distantes.

A figura 3.9 mostra os resultados obtidos neste trabalho e os dados obtidos por Rudd e colaboradores até 450 keV [14]. Apesar da lacuna de 550 keV entre os dois conjuntos de dados, os pontos parecem acompanhar a tendência, indicando outra vez a consistência dos resultados obtidos.

As figuras 3.10 mostram gráficos ternários, onde os três eixos x, y e z, representam $P_1(\text{H}_2\text{O}^+)$, $P_2(\text{OH}^+)$ e $P_3(\text{O}^+)$, respectivamente, as proporções normalizadas de cada fragmento para cada energia e processo, de tal modo que $P_1 + P_2 + P_3 = 1$. O gráfico ternário da figura 3.10(a) contém dados de ionização (quadrados), perda (triângulos invertidos) e captura (triângulos), por impacto de prótons (Ref.([18]), em preto), He^+ (este trabalho, em vermelho) e C^{3+} (Ref. [15], em verde). Já a figura 3.10(b), além dos dados da figura 3.10(a), são incluídos dados de fragmentação produzidos por elétrons [28], fótons [29] e O^{5+} [15].

No trabalho de Luna e Montenegro [15] foi observado que todos os resultados coalescem ao longo de uma linha no gráfico ternário das frações, como mostrado pela figura 3.10, independentemente da energia (e, portanto, da velocidade), do estado de carga final e, inclusive, do canal de colisão que originou a fragmentação.

Os dados apresentados neste trabalho também se distribuíram ao longo dessa linha, concordando com os resultados anteriores: as medidas com fótons, elétrons e prótons na extremidade direita, relacionada à fragmentação seqüencial; os dados obtidos com carbono e oxigênio se espalhando até a extremidade esquerda da linha, relacionada com a fragmentação explosiva; e as medidas deste trabalho, usando He^+ , espalhando-se na região central, entre os dados de prótons e os de carbono e oxigênio, como se pode ver na figura 3.10.

A única discrepância aparente entre os dados de C^{3+} e os de He^+ diz respeito às tendências das velocidades. A figura 3.11 mostra um gráfico ternário para cada canal, onde os pontos estão unidos e uma seta indica a direção de crescimento da energia. Fica claro nesta figura que os dados de C^{3+} caminham prioritariamente para esquerda, em direção a um padrão explosivo de fragmentação, à medida que a energia cresce. Enquanto isso, os dados de He^+ caminham prioritariamente para a direita, em direção ao padrão dipolar, onde a maioria das fragmentações libera dois íons apenas, OH^+ e H^+ . Assim

parece haver uma divergência entre os resultados. Entretanto, analisando com mais cuidado os dados de C^{3+} , percebemos que nem sempre eles caminham em direção à esquerda. Na verdade, a seqüência de pontos caminha inicialmente para a direita até atingir um ponto onde se inverte a direção do crescimento de energia. Esse ponto de retorno dá uma indicação do valor em energia para o qual a fragmentação da molécula exhibe comportamento explosivo máximo. Sendo assim, é de se esperar que os dados de He^+ , que caminham todos para a direita, estejam, na verdade, todos acima dessa energia, onde ocorre o máximo da “explosividade”.

Ainda no trabalho citado [15], Luna e Montenegro obtêm, através de um ajuste linear dos dados no gráfico ternário, uma equação que determina uma relação entre a seção de choque dos três fragmentos iônicos em questão, mostrada nos gráficos ternários das figuras 3.10 e 3.11 por uma linha pontilhada. Comparando essa equação com outra, calculada a partir de um sistema de equações que relaciona essas mesmas seções de choque com as seções de choque totais por canal (ionização, perda e captura eletrônicas), é possível determinar uma lei empírica capaz de fornecer a seção de choque para produção do fragmento H^+ em função das outras seções de choque ($\sigma_{H_2O^+}$, σ_{OH^+} , σ_{O^+}). O procedimento é descrito no apêndice D. Foram gerados, então, com base nesse procedimento, resultados empíricos para a seção de choque de produção de H^+ e, em seguida, comparados com os dados experimentais previamente obtidos. Seguindo esse mesmo procedimento e utilizando as equações (e seus parâmetros) obtidas por Luna e Montenegro [15], foram gerados dados teóricos para a produção de H^+ com base nas outras seções de choque obtidas experimentalmente neste trabalho. Os resultados teóricos foram, então, comparados com os dados obtidos experimentalmente para produção de H^+ , como pode ser visto na figura (3.12). Mais uma vez o resultado concordou com o obtido por Luna e Montenegro, apresentando uma coerência razoável entre os dados experimentais e os obtidos através do modelo empírico, maior para o canal de perda eletrônica e menor para a ionização. Quanto à captura eletrônica, o único dado obtido neste trabalho impede uma avaliação da tendência, apesar de ter sido o ponto que apresentou menor diferença entre o resultado experimental e o teórico.

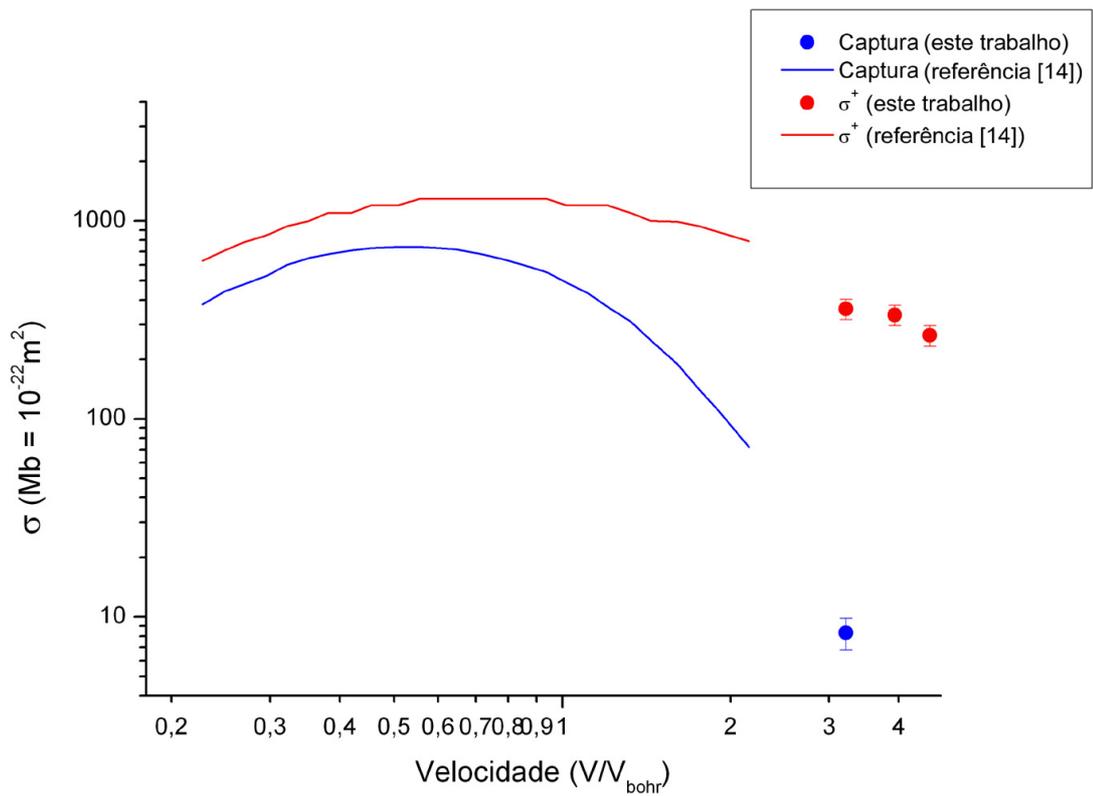
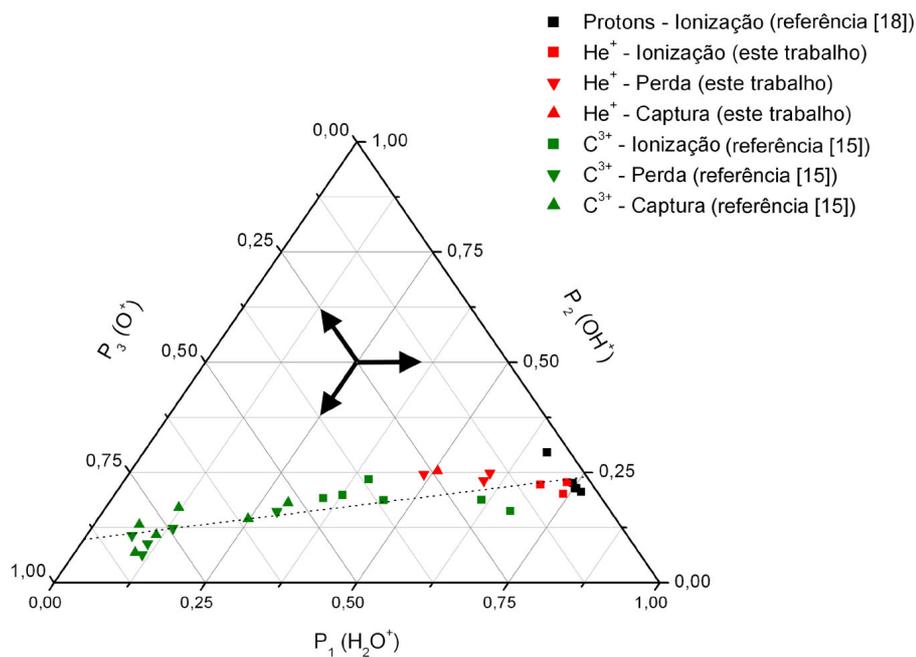
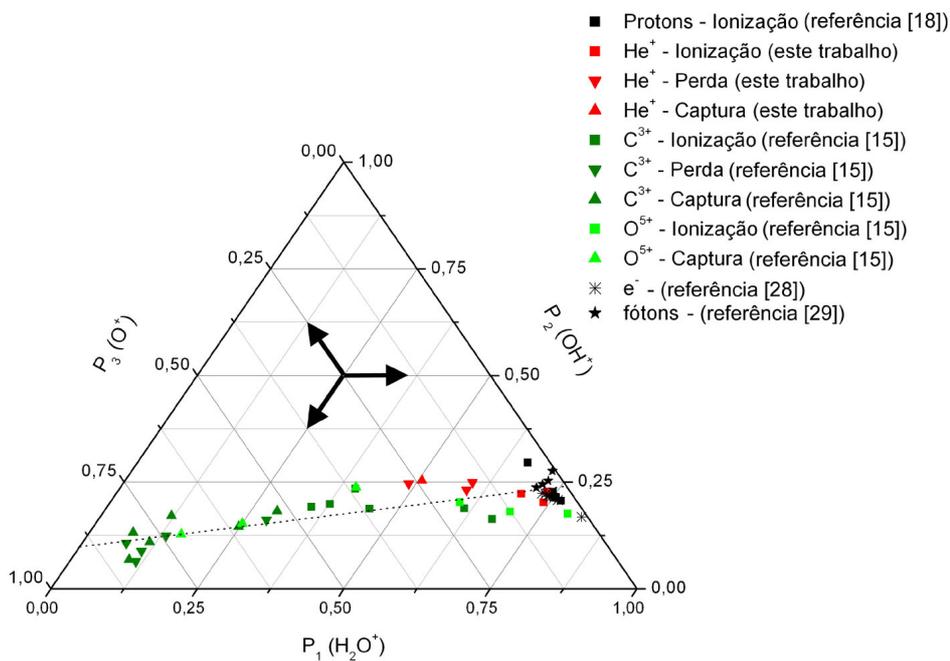


Figura 3.9: Seções de choque de ionização da molécula de vapor d'água por He^+ , em função da velocidade. Em azul, seções de choque de captura e, em vermelho, de produção de íons positivos. As linhas são a referência [14] e os pontos, este trabalho.

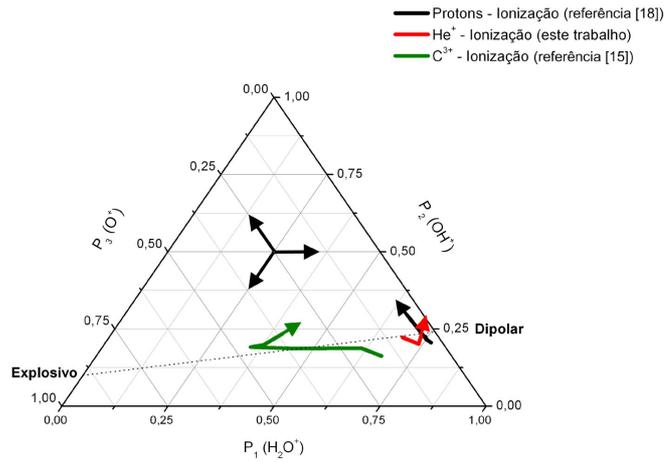


a)

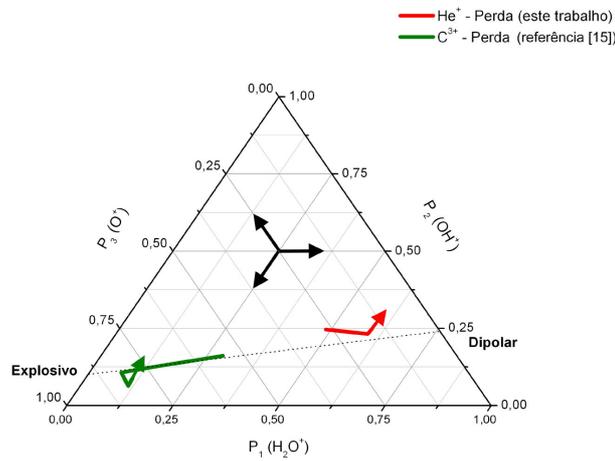


b)

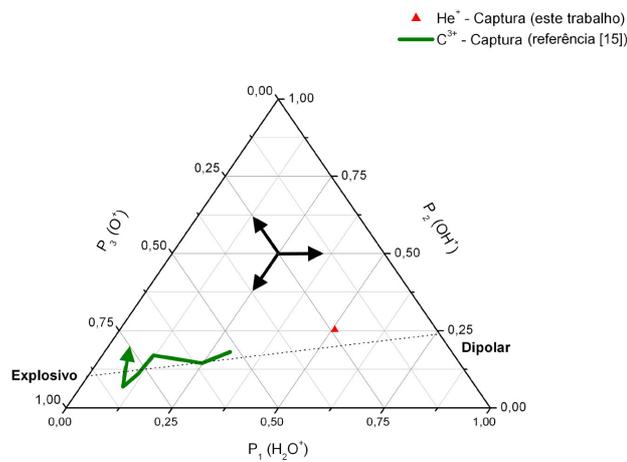
Figura 3.10: Gráfico ternário das probabilidades de formação de H₂O⁺ (P₁), OH⁺ (P₂) e O⁺ (P₃) por ionização (quadrados), perda eletrônica (triângulos invertidos) e captura eletrônica (triângulos) por impacto de prótons (pretos), He⁺ (vermelhos) e C³⁺ (verdes). A linha pontilhada é o ajuste linear para os dados. Em (a), somente dados do laboratório VDG da PUC-Rio e em (b), os mesmos de (a) mais dados de O⁵⁺ [15], também medidos no VDG, em verde claro; elétrons, (Ref. [28]) em cruces e fótons (Ref. [29]) em estrelas.



a)



b)



c)

Figura 3.11: O mesmo que para figura 3.10(a), porém separado por processo: (a) ionização, (b) perda eletrônica e (c) captura eletrônica. Os pontos foram ligados e uma seta aponta a direção do crescimento da velocidade.

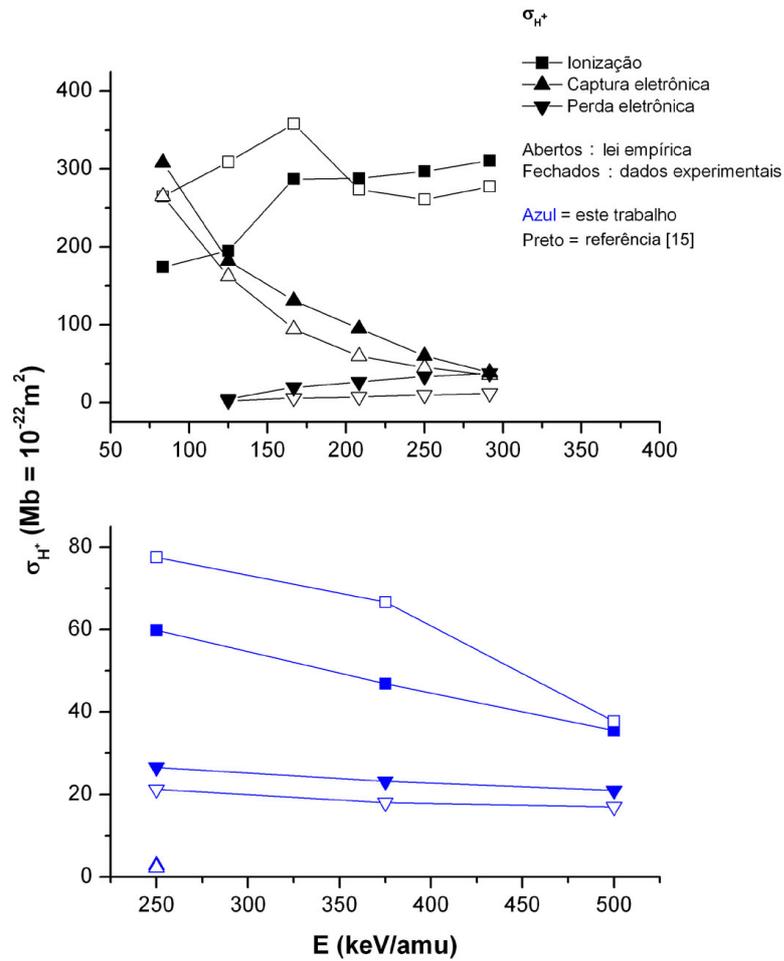


Figura 3.12: Comparação entre o modelo empírico e os dados experimentais para a seção de choque de produção de H^+ ($\sigma_{H_2O^+}$). Em preto, dados obtidos em [15]. Em azul, este trabalho. Símbolos vazios, modelo empírico. Símbolos cheios, resultados experimentais.