

MUDANÇAS NAS PROPRIEDADES DE TRANSPORTE NA BORDA DO PLASMA DO TOKAMAK TBR-1 DEVIDO À AÇÃO DE CAMPOS MAGNÉTICOS HELICOIDAIS

C. Ribeiro, R.P. da Silva, I.L. Caldas e Grupo do TBR-1

Departamento de Física Experimental, Laboratório de Física de Plasma, Instituto de Física da Universidade de São Paulo, C.P.20516, 01498 São Paulo, SP, Brasil

RESUMO:

São mostrados aqui alguns resultados de um estudo sobre o fenômeno de transporte de partículas e energia na borda do plasma do tokamak TBR-1. Nesta região foram aplicados campos magnéticos helicoidais (CMH) de helicidade  $m/n = 4/1$  e intensidades variáveis: corrente helicoidal  $I_h = 0, 150, 250, 350$  e  $450A$ . Mediu-se naquela região, com o auxílio de sondas de Langmuir, o potencial flutuante do plasma ( $V_f$ ), a temperatura eletrônica ( $T_e$ ), o potencial do plasma ( $V_p$ ) e a densidade do plasma ( $n_0$ ). Quando os CMH eram aplicados, observamos: um aumento de  $V_f$  e  $V_p$ ; uma redução em  $T_e$  e  $n_e$  na região que antecede o limitador e um aumento na região da sombra do limitador; e, por fim, uma diminuição na corrente de plasma ( $I_p$ ).

1. INTRODUÇÃO

O controle da interação plasma-parede tem recebido grande atenção nos trabalhos recentes ligados à pesquisa da Fusão Nuclear Controlada em máquinas de confinamento magnético. Nestas máquinas é desejável que se tenha, em sua borda, uma camada de plasma relativamente densa e fria, a fim de reduzir a liberação de impurezas (elementos metálicos) provenientes do vaso e do limitador e também a migração destas impurezas no estado não ionizado em direção ao centro do plasma. É desejável, também, que haja uma deposição uniforme do calor no vaso e no limitador.

Uma maneira de atingir estes objetivos é aumentar o transporte térmico dos elétrons por meio da caotização das linhas de campo que formam as superfícies magnéticas localizadas na borda do plasma, isto é, próximas ao limitador e ao vaso<sup>(1)</sup>. Este processo pode ser obtido através da aplicação de campos magnéticos helicoidais (CMH) sobre o campo magnético de equilíbrio na borda do plasma, provocando, assim, a superposição entre as ilhas magnéticas criadas pelos CMH, fazendo com que a estrutura local do campo magnético resultante se torne caótica. A esta estrutura em particular, juntamente com os fenômenos que dela provém, chamamos de limitador magnético helicoidal<sup>(2)</sup>.

Este artigo descreve um trabalho experimental realizado no tokamak TBR-1 (um tokamak de pequeno porte em operação no Instituto de Física da Universidade de São Paulo), a respeito da influência dos CMH no fenômeno de transporte de partículas e energia na borda do plasma deste tokamak<sup>(3)</sup>. É conveniente, pois, citar os principais parâmetros e grandezas físicas associadas ao TBR-1, quais sejam: R (raio maior) = 0,30 m;  $a_v$  (raio do vaso) = 0,11 m;  $a$  (raio do plasma) = 0,08 m; R/a (razão de aspecto) = 3,75; B (campo magnético toroidal de equilíbrio)  $\approx 0,5$  T;  $n_{oc3}$  (densidade central do plasma)  $\approx 5 \times 10^{18} m^{-3}$ ;  $T_{ec}$  (temperatura central eletrônica)  $\approx 200eV$ .

2. ARRANJO EXPERIMENTAL

Nesta experiência foi utilizado um plasma de hidrogênio, cuja pressão de base antes da descarga era de  $1,2 \times 10^{-4}$  mbar. Para tanto o vaso foi previamente condicionado através do método Taylor de limpeza (descargas pulsadas de plasma), utilizando como gás o hidrogênio à pressão de  $5,0 \times 10^{-4}$ . Antes do processo de limpeza o vaso era evacuado até a pressão  $1,0 \times 10^{-6}$  mbar. Realizava-se, para efeito de monitoração de impurezas, análises residuais dos gases nas etapas descritas anteriormente.

Além dos diagnósticos básicos utilizados para a medida da corrente plasma ( $I_p$ ), da tensão de enlace ( $V_e$ ), das posições horizontal e vertical da coluna de plasma ( $P_h$  e  $P_v$ ) e da emissão de raios-x de alta energia ( $R_x$ ), utilizou-se um conjunto de bobinas magnéticas distribuídas poloidalmente (8 delas) e toroidalmente (3 outras), a fim de detectarem as oscilações de Mirnov<sup>(4)</sup>. Utilizou-se também duas sondas de Langmuir geminadas: a primeira estava acoplada a um gerador de varredura usado para a obtenção de curvas características corrente-tensão, através das quais obteremos  $T_e$  e  $n_0$ <sup>(5)</sup>; a segunda sonda foi acoplada a um circuito eletrônico de alta impedância, cuja finalidade era medir diretamente  $V_f$ <sup>(3)</sup>.

Os CMH foram produzidos por correntes elétricas circulando por um conjunto de

bobinas presas externamente ao vaso<sup>(6)</sup>. Estas bobinas possuíam helicidade  $m/n = 4/1$  (onde  $m$  e  $n$  são os números de onda poloidal e toroidal, respectivamente). Os CMH, assim produzidos, atuam mais intensamente sobre a superfície magnética racional  $q = m/n = 4/1$ , localizada na borda do plasma ( $r \approx 7,2$  cm), dadas as nossas condições experimentais<sup>(3)</sup>. A corrente ( $I_h$ ) que criava os CMH era produzida por uma fonte de corrente elétrica e seu perfil era de um pulso retangular com intensidade e duração variáveis. Nesta experiência utilizou-se pulsos de  $\approx 1$  ms de duração e intensidades de 0, 150, 250, 350 e 450A. As medidas feitas com as sondas de Langmuir foram realizadas na região  $5,5 \leq r(\text{cm}) \leq 10,8$ .

Todos os sinais dos diagnósticos básicos ( $I_p$ ,  $V_e$ ,  $P_h$ ,  $P_v$ ,  $R_x$ ), os das sondas de Langmuir, bobinas de Mirnov e  $I_h$  foram acoplados a um sistema de aquisição de dados do tipo CAMAC, baseado nos módulos digitalizadores Le Croy 2264 (8 bits, 8 canais, 500 kHz de frequência de amostragem). O sistema de aquisição de dados era controlado por um computador do tipo IBM-PC.

### 3. RESULTADOS

Na figura 1a são apresentados os perfis temporais de 4 sinais:  $I_p$ ,  $I_h$ ,  $P_h$  e  $V_f$ . A duração de  $I_p$  é  $\approx 7$  ms e sua intensidade máxima de  $\approx 8$  kA. Neste pulso os CMH não foram acionados ( $I_h = 0$ ). Na figura 1b, onde os mesmos sinais são mostrados, podemos observar os efeitos dos CMH ( $I_h = 450$  A,  $\approx 1$  ms) em  $V_f$  e  $I_p$ . Com a aplicação dos CMH notamos um aumento de  $\approx 20$  V em  $V_f$  e uma pequena redução em  $I_p$  ( $\approx 0,7$  kA). Em ambas as descargas a sonda estava posicionada em  $r = 6,6$  cm.

Na figura 2 são mostrados dois perfis radiais de  $V_f$ : um com a aplicação dos CMH ( $I_h = 450$  A) e outro sem ( $I_h = 0$ ). Comparando-se os dois perfis percebemos que o efeito dos CMH é, na maioria das regiões de medida, o de aumentar  $V_f$ .

Na figura 3 é mostrado o perfil radial de  $T_e$ . Observamos que a presença dos CMH acarretou uma diminuição e um aumento de  $T_e$  em  $r = 7,7$  cm e  $r = 8,6$  cm, respectivamente.

Já na figura 4 mostramos o perfil radial de  $V_p$ . Claramente se observa um aumento de  $V_p$  na região da sombra do limitador quando se aplicam os CMH ao plasma. Aqui  $V_p$  foi obtido da expressão  $V_p = V_f + 2,6T_e$ , que descreve adequadamente o plasma da borda do TBR-1<sup>(3)</sup>.

Por fim, na figura 5, mostramos os perfis radiais de  $n_0$  obtidos no intervalo  $2 < t(\text{ms}) < 3$  das descargas, ou seja, no início do platô de  $I_p$ . São mostrados dois

modelos: o modelo clássico, no qual são levados em consideração inclusive as correções referentes à temperatura iônica, mas que considera a área da bainha ( $A_b$ ) aproximadamente igual a área da sonda ( $A_s$ ), isto é,  $A_b \approx A_s$ <sup>(3)</sup> e o modelo por nós proposto, no qual  $A_b > A_s$  (que é, em princípio, mais adequado à nossa realidade experimental<sup>(3)</sup>). Em ambos os modelos notamos que, devido à atuação dos CMH, houve uma diminuição e um aumento de  $n_0$  em  $r = 7,7$  cm e  $r = 8,6$  cm, respectivamente.

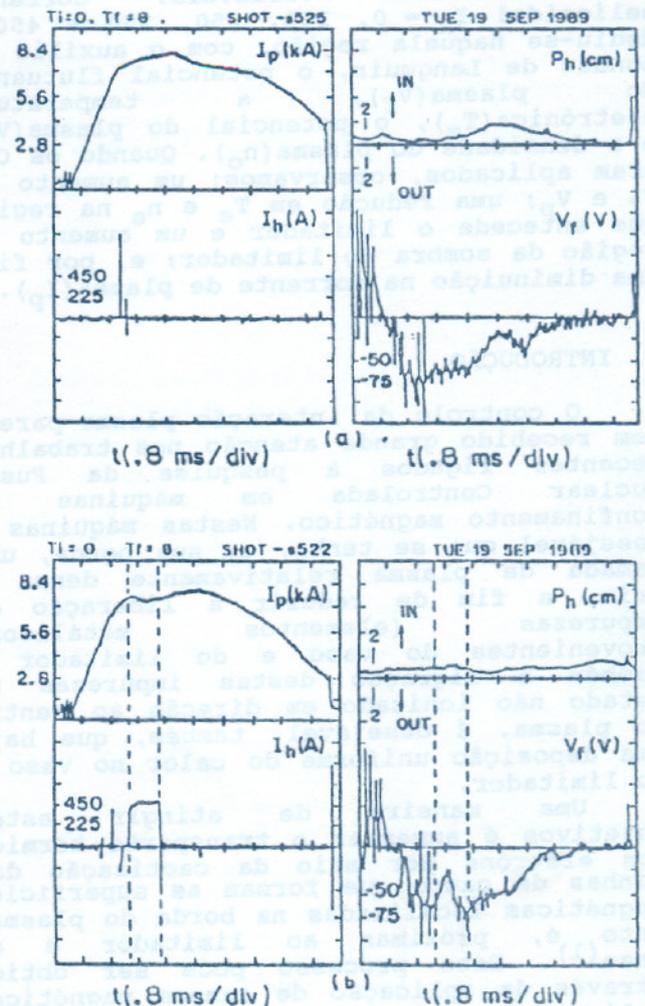


fig.1 - Corrente de plasma ( $I_p$ ), posição horizontal ( $P_h$ ), corrente helicoidal ( $I_h$ ) e o potencial flutuante do plasma ( $V_f$ ) para descargas com (b) e sem (a) os CMH.

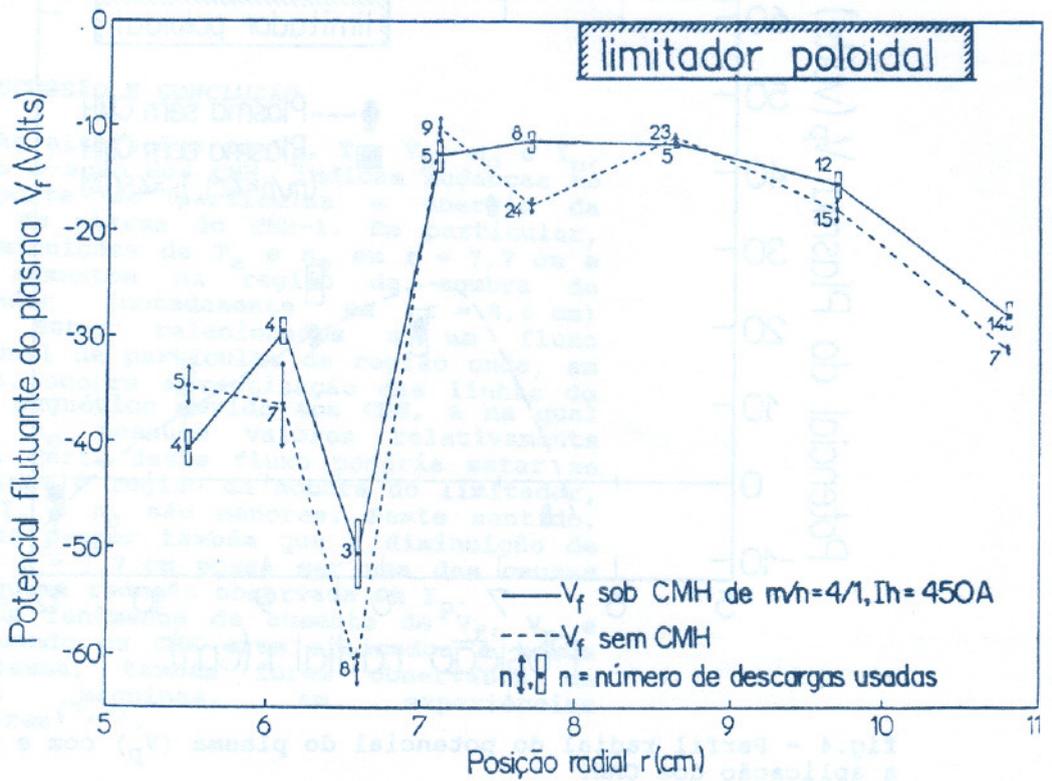


fig.2 - Perfil radial do potencial flutuante do plasma ( $V_p$ ) com e sem a aplicação dos CMH.

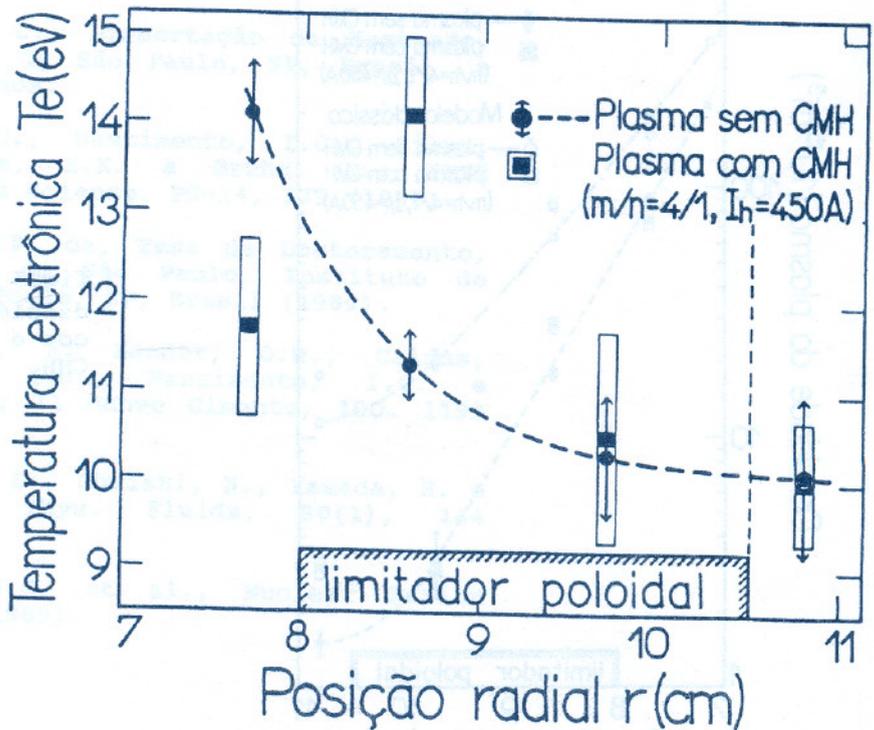


fig.3 - Perfil radial da temperatura eletrônica ( $T_e$ ) com e sem a aplicação dos CMH.

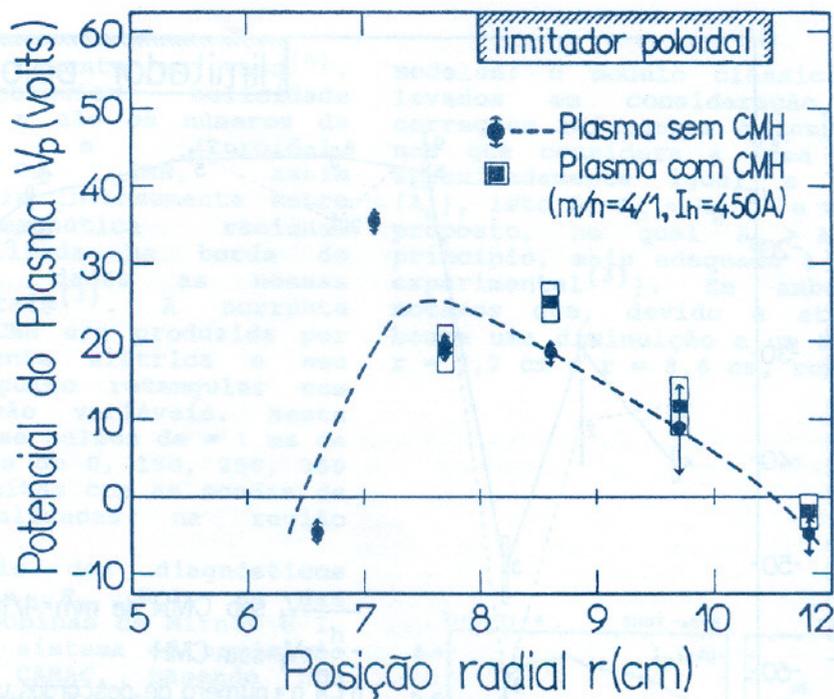


fig.4 - Perfil radial do potencial do plasma ( $V_p$ ) com e sem a aplicação dos CMH.

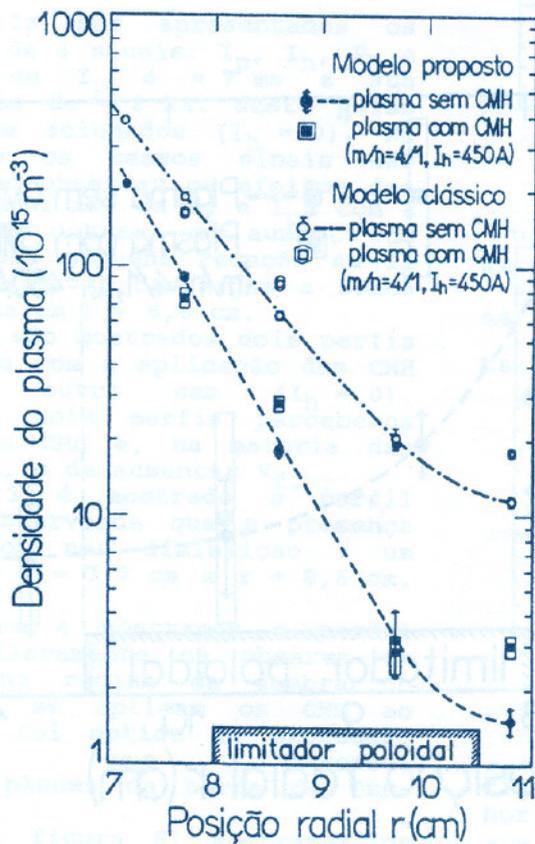


fig.5 - Perfil radial da densidade do plasma ( $n_0$ ) com e sem a aplicação dos CMH.

#### 4. DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

As alterações em  $V_f$ ,  $T_e$ ,  $V_p$ ,  $n_o$  e  $I_p$ , devido à ação dos CMH, indicam mudanças no transporte de partículas e energia da borda do plasma do TBR-1. Em particular, as diminuições de  $T_e$  e  $n_o$  em  $r = 7,7$  cm e seus aumentos na região da sombra do limitador (notadamente em  $r = 8,6$  cm) podem estar relacionados a um fluxo adicional de partículas da região onde, em teoria, ocorre a caotização das linhas do campo magnético devido aos CMH, e na qual  $T_e$  e  $n_o$  possuem valores relativamente altos. Parte deste fluxo poderia estar se dirigindo à região da sombra do limitador, onde  $T_e$  e  $n_o$  são menores. Neste sentido, podemos propor também que a diminuição de  $n_o$  em  $r = 7,7$  cm possa ser uma das causas da pequena redução observada em  $I_p$ .

Os fenômenos de aumento de  $V_f$ ,  $V_p$  e  $I_p$ , quando os CMH eram aplicados à borda do plasma, também foram observados em outras máquinas, em experiências similares (7,8).

#### 5. REFERÊNCIAS

1. Rochester, A.B. e Rosenbluth, M.N.; Phys. Rev. Lett. 40, 38 (1978).
2. Feneberg, W. e Wolf, G.H.; Nuclear Fusion, 21, 669 (1981).
3. Ribeiro, C.; Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, SP, Brasil, a ser apresentada.
4. Tan, I.H., Nascimento, I.C., Silva, R.P., Sanada, E.K. e Bruha, R.; IEEE Trans. Plasma Science, PS-14, 279 (1986).
5. Silva, R.P. da, Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, Instituto de Física, São Paulo, SP, Brasil (1989).
6. Vannucci, A. Bender, O.W., Caldas, I.L., Tan, I.H., Nascimento, I.C. e Sanada, E.K.; Il Nuovo Cimento, 10D. 1193 (1988).
7. Takamura, S., Ohmishi, N., Yamada, H. e Okuda, T.; Phys. Fluids, 30(1), 144 (1987).
8. McCool S.C. et al., Nuclear Fusion 29(4), 547 (1989).