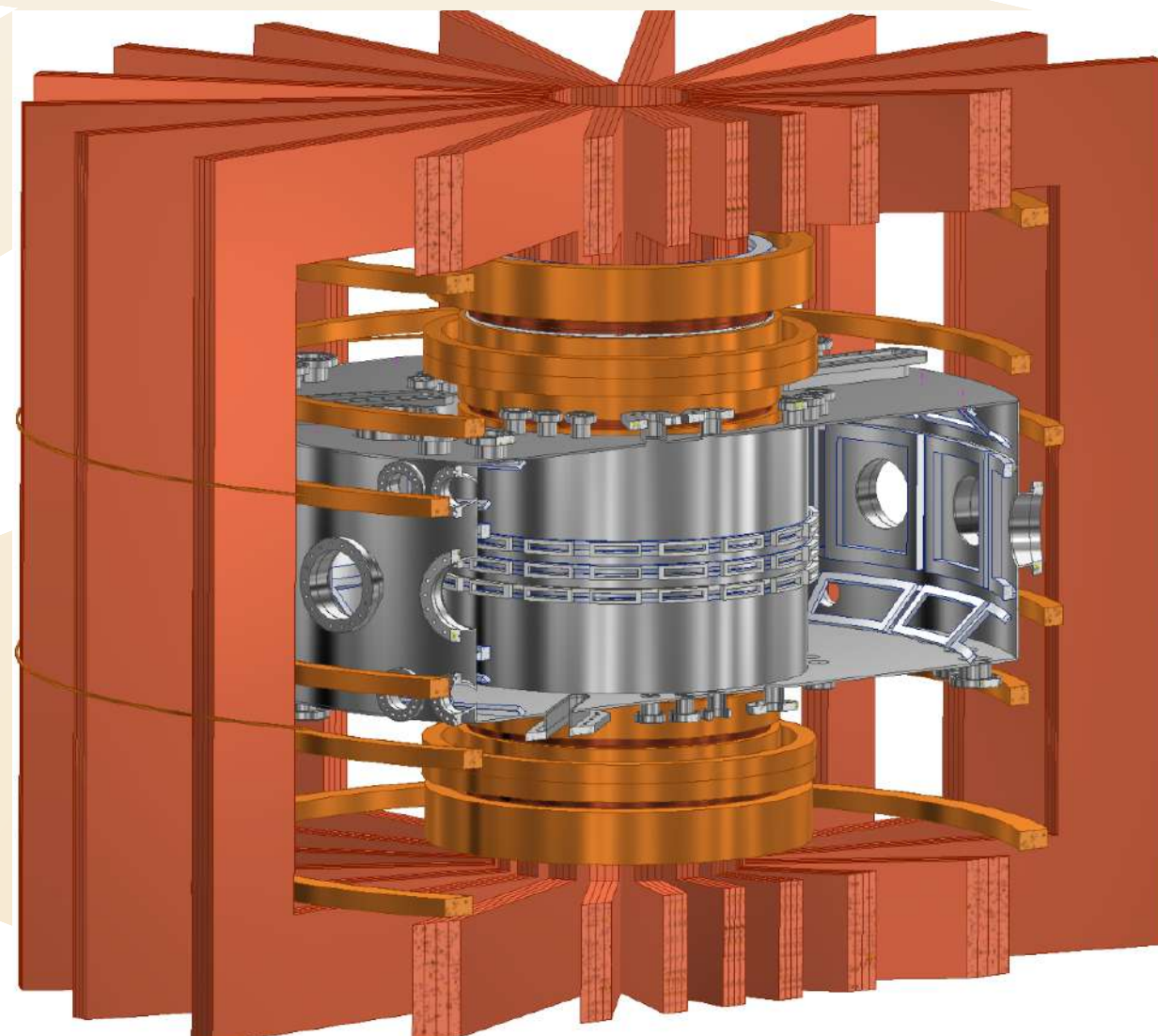


Modernização do tokamak TCABR para estudos de supressão de ELMs por campos RMP

Apresentado por
Gustavo Paganini Canal
Laboratório de Física de Plasmas
Instituto de Física
Universidade de São Paulo

Apresentado remotamente durante o
I Seminário de Fusão Nuclear

Organizado por
Comissão Nacional de Energia Nuclear
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Instituto de Física da USP



Seção de corte do tokamak TCABR
com bobinas RMP

São Paulo, 12 de agosto de 2021

Modernização do tokamak TCABR para estudos de supressão de ELMs por campos RMP

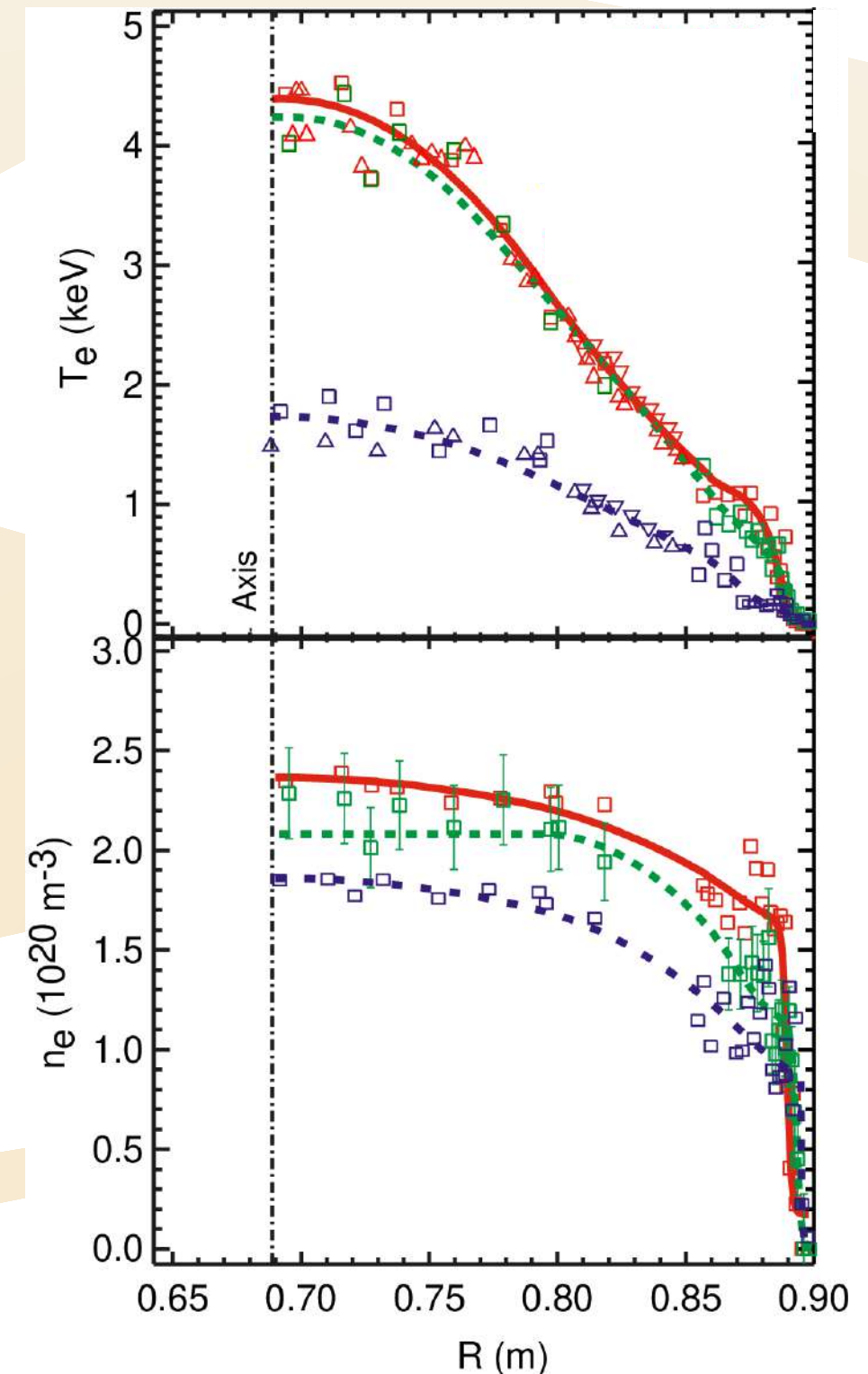
- Os desafios científicos e tecnológicos associados ao disparo de ELMs
- **O modernização do TCABR**
 - O tokamak TCABR
 - Projeto e instalação de um conjunto inovador de bobinas RMP
 - Desenvolvimento de um sistema de controle de cenários de plasmas
 - Projeto e instalação de ladrilhos de grafite
 - Desenvolvimento de um sistema de injeção de helicidade
- **Resumo**

Modernização do tokamak TCABR para estudos de supressão de ELMs por campos RMP

- Os desafios científicos e tecnológicos associados ao disparo de ELMs
- O modernização do TCABR
 - O tokamak TCABR
 - Projeto e instalação de um conjunto inovador de bobinas RMP
 - Desenvolvimento de um sistema de controle de cenários de plasmas
 - Projeto e instalação de ladrilhos de grafite
 - Desenvolvimento de um sistema de injeção de helicidade
- Resumo

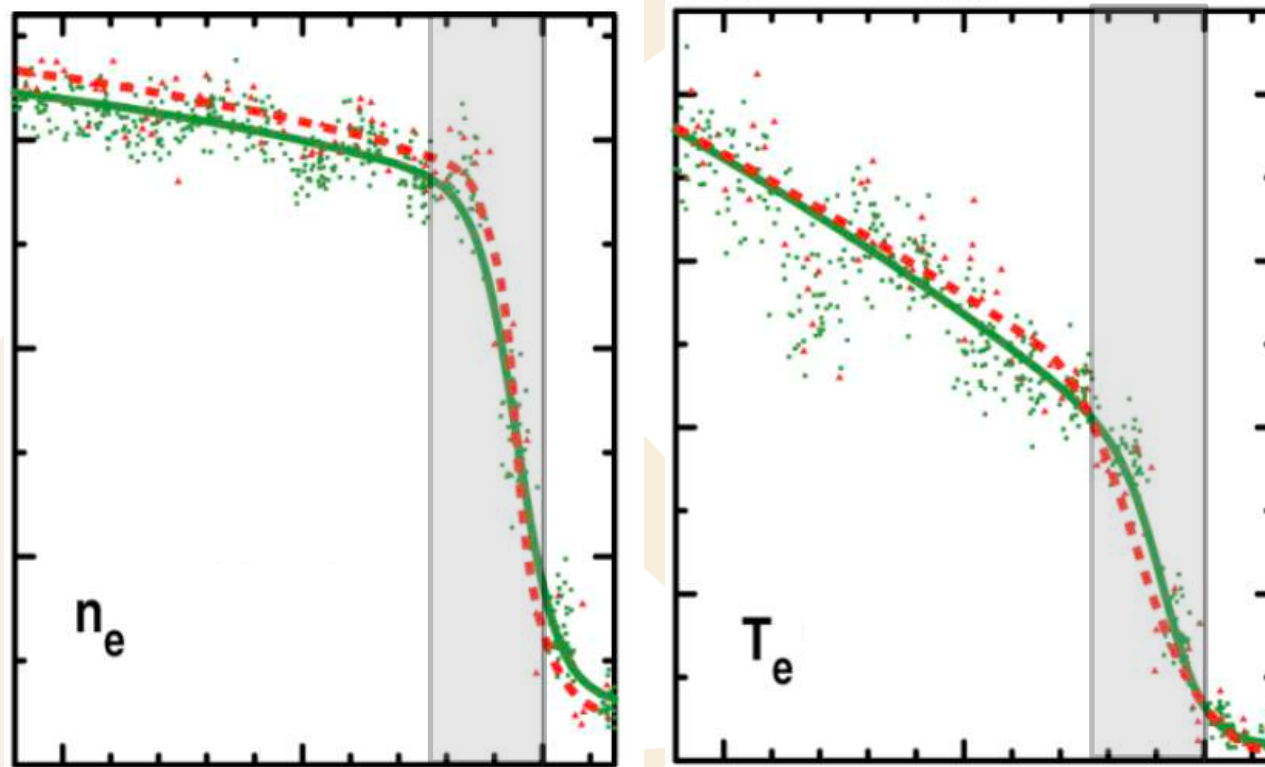
O modo de alto confinamento é o regime operacional mais promissor para a obtenção de plantas de potência a fusão comercial

- O modo H foi descoberto acidentalmente em 1982 por Friedrich Wagner e co-autores no tokamak ASDEX, no Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Garching - Alemanha
 - *"It was a totally unexpected transition. It wasn't predicted, it just happened"*

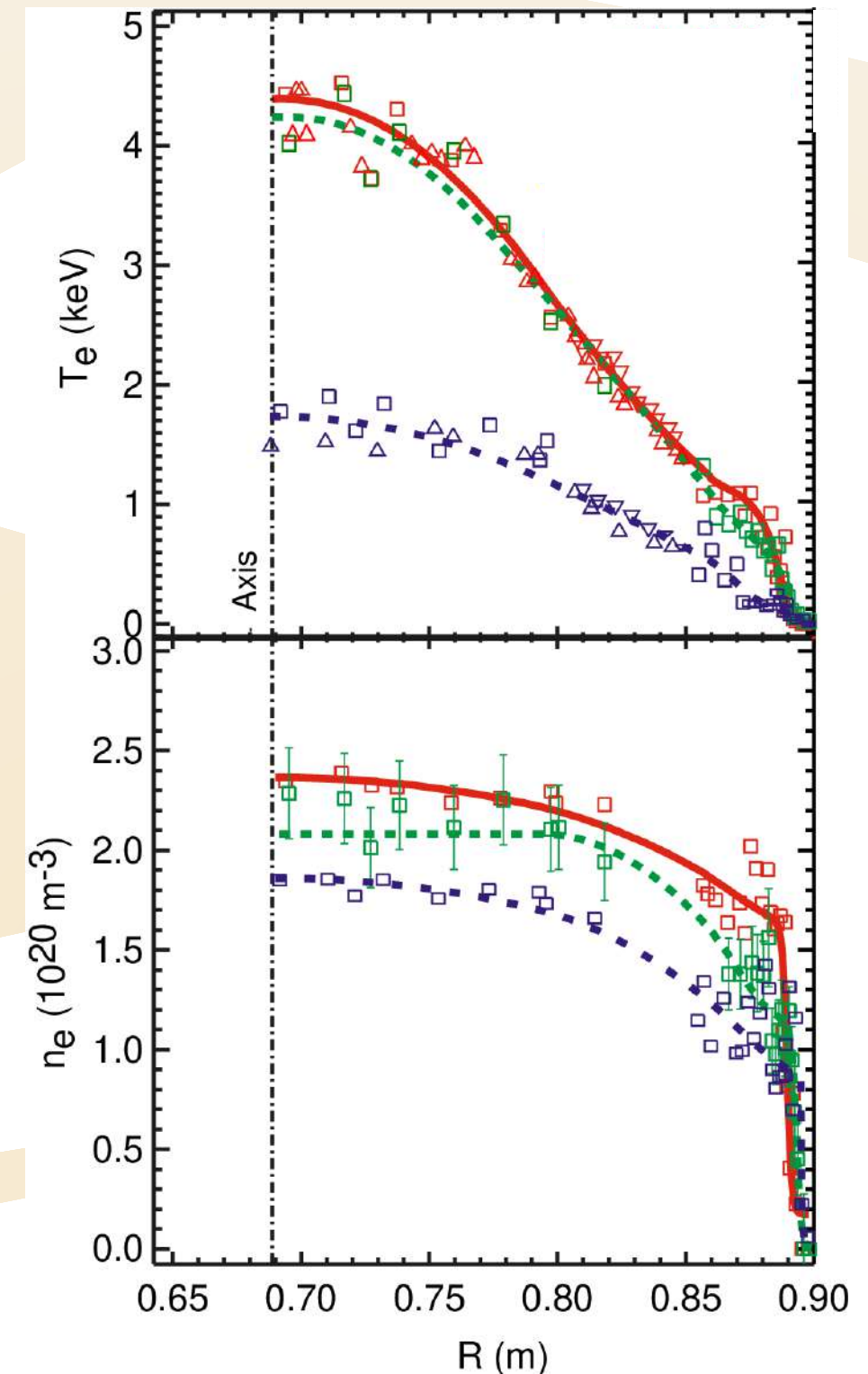


O modo de alto confinamento é o regime operacional mais promissor para a obtenção de plantas de potência a fusão comercial

- O modo H foi descoberto acidentalmente em 1982 por Friedrich Wagner e co-autores no tokamak ASDEX, no Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Garching - Alemanha
 - *"It was a totally unexpected transition. It wasn't predicted, it just happened"*

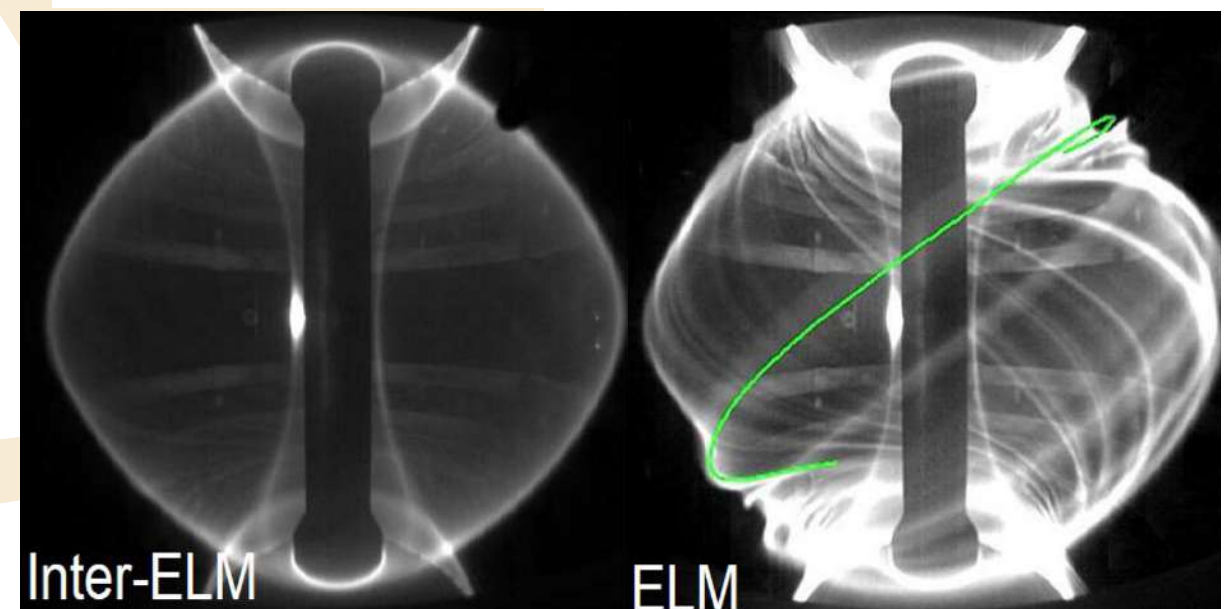
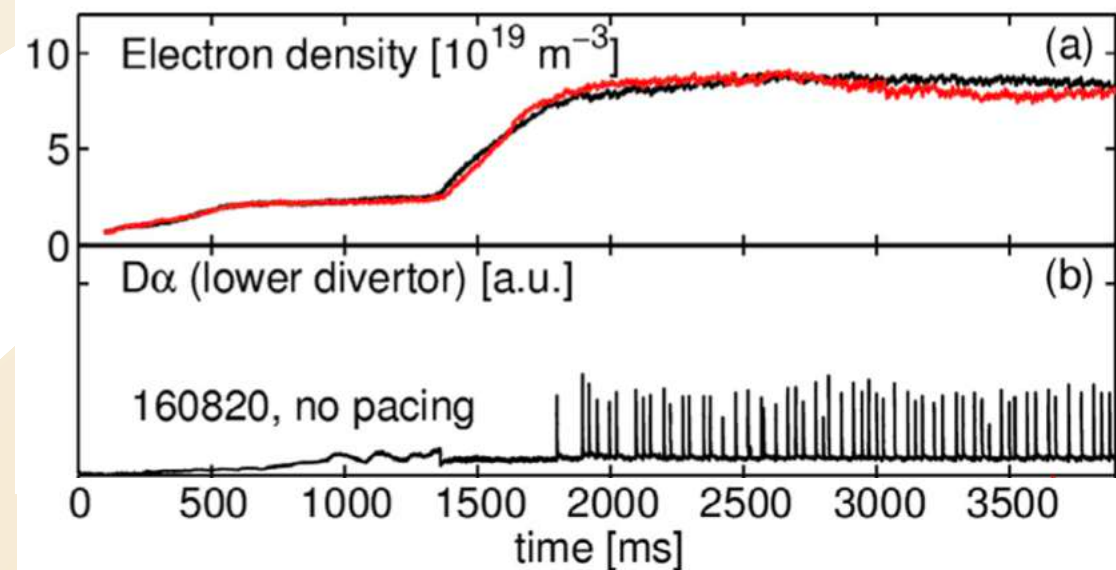
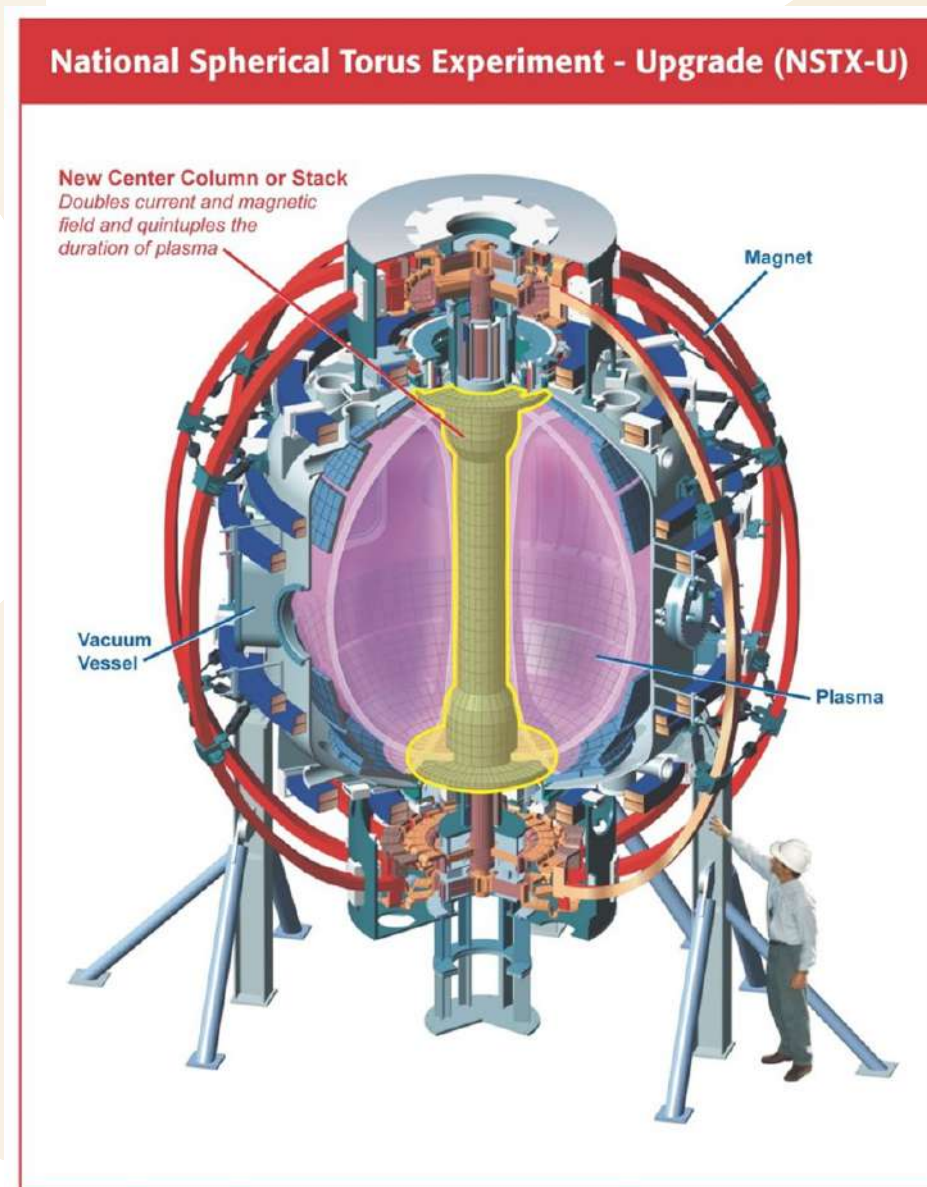


Barreiras de transporte em n_e e T_e



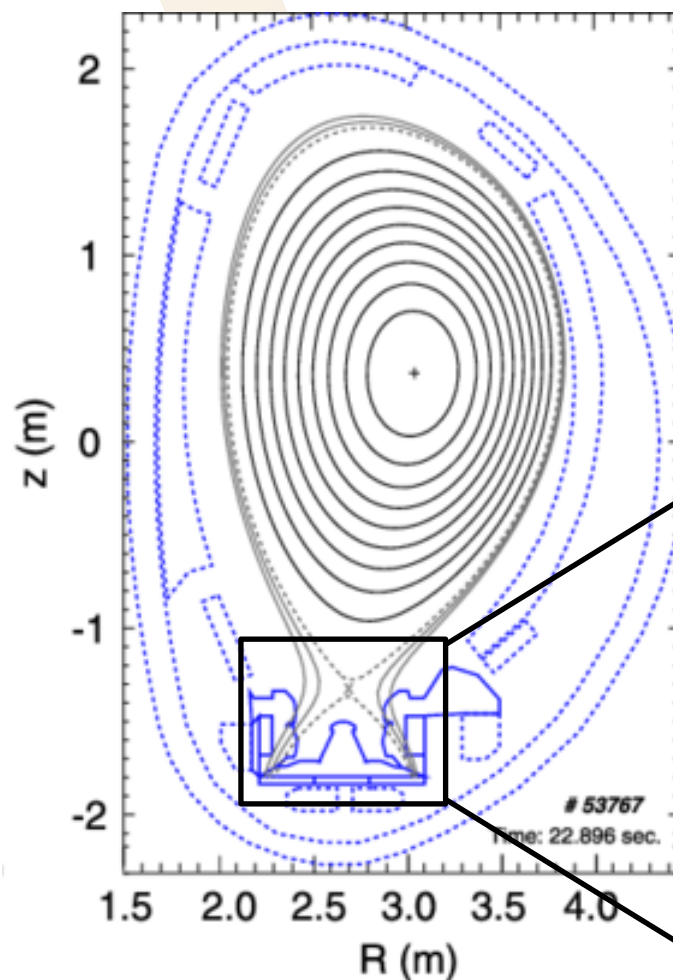
Plasmas operados no modo H são instáveis à instabilidades denominadas *Edge Localized Modes*

- Cálculos baseados no modelo magnetohidrodinâmico (MHD) ideal revelam que *Edge Localized Modes* (ELMs) correspondem à manifestação de modos chamados *peeling-ballooning*

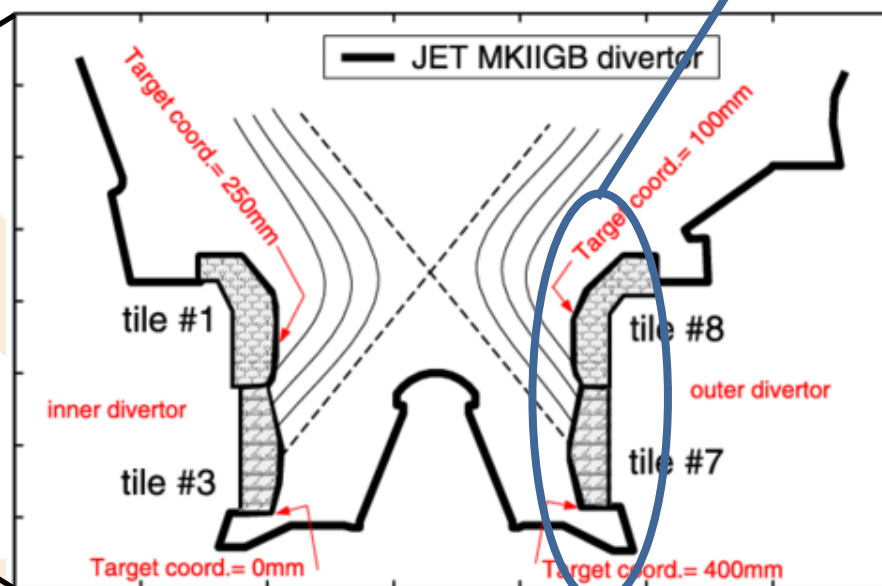


A deposição de potência em regime estacionário (entre ELMs) nas placas do divertor já é uma preocupação em máquinas como o JET

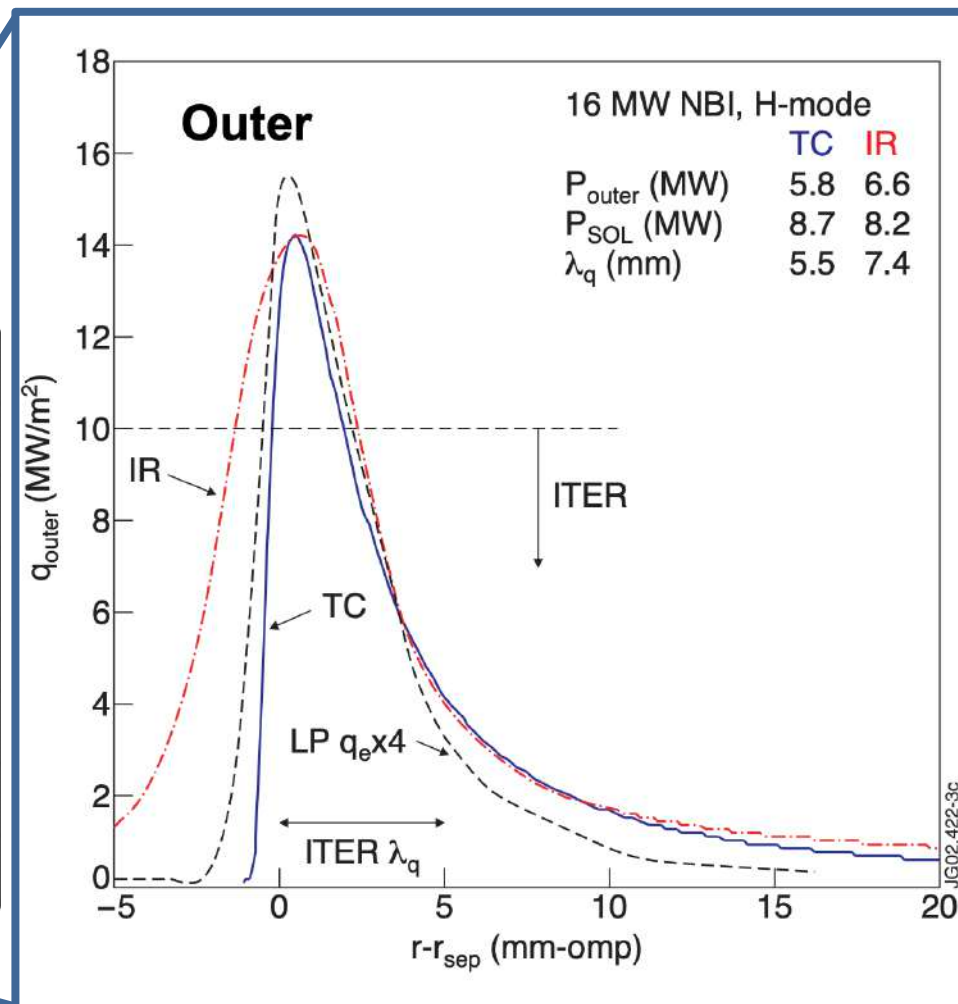
- Atualmente, materiais sujeitos à refrigeração ativa/forçada podem suportar fluxos de calor de até 12 MW/m^2
 - Máquinas como JET, ASDEX-Upgrade, DIII-D, NSTX-U, entre outras, já operam com fluxos de calor próximo desse limite



Tokamak JET

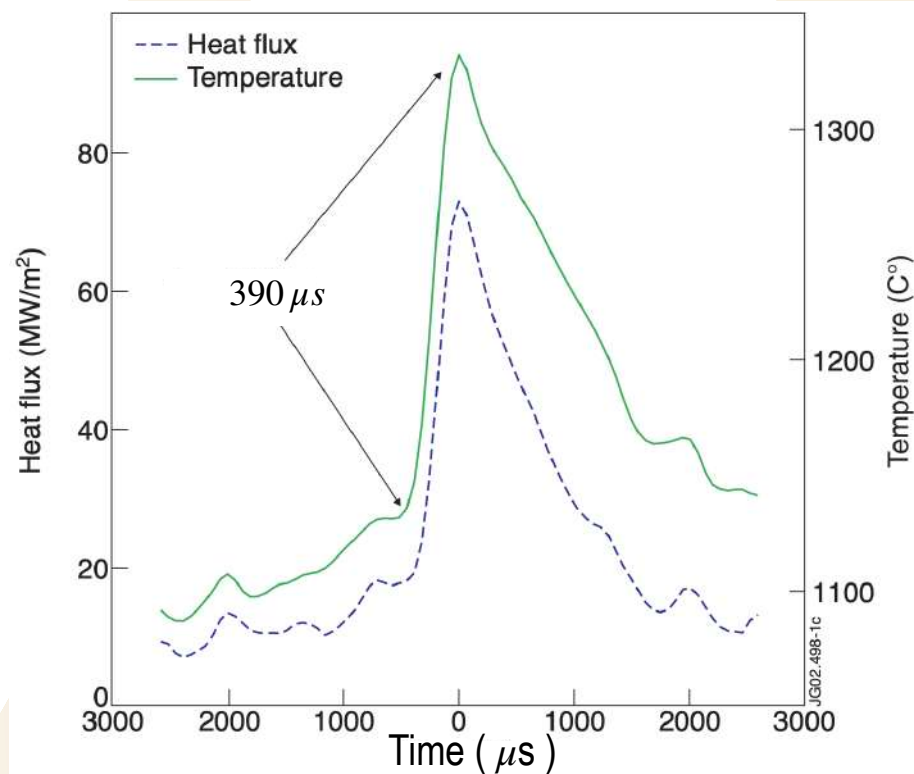


Fluxo de calor estacionário (entre ELMs)

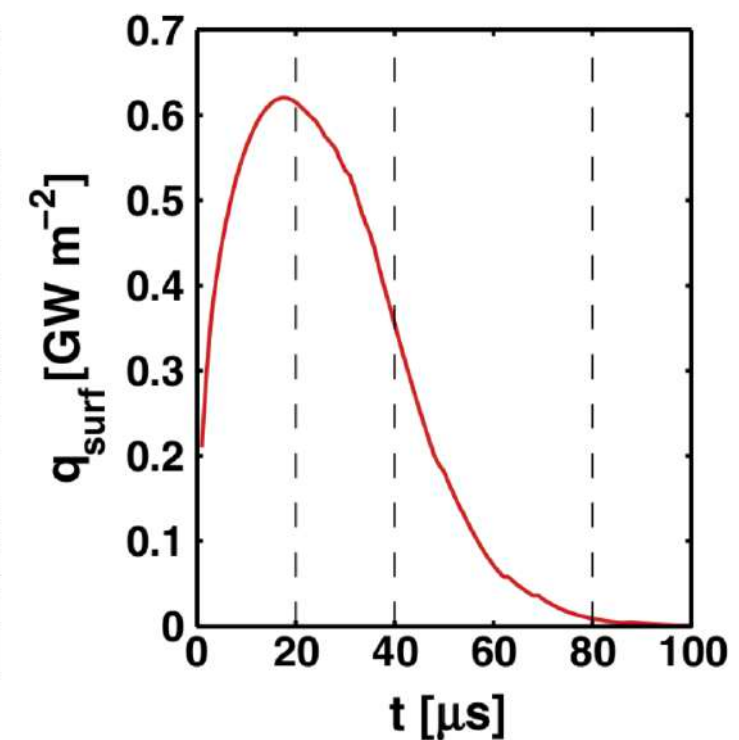
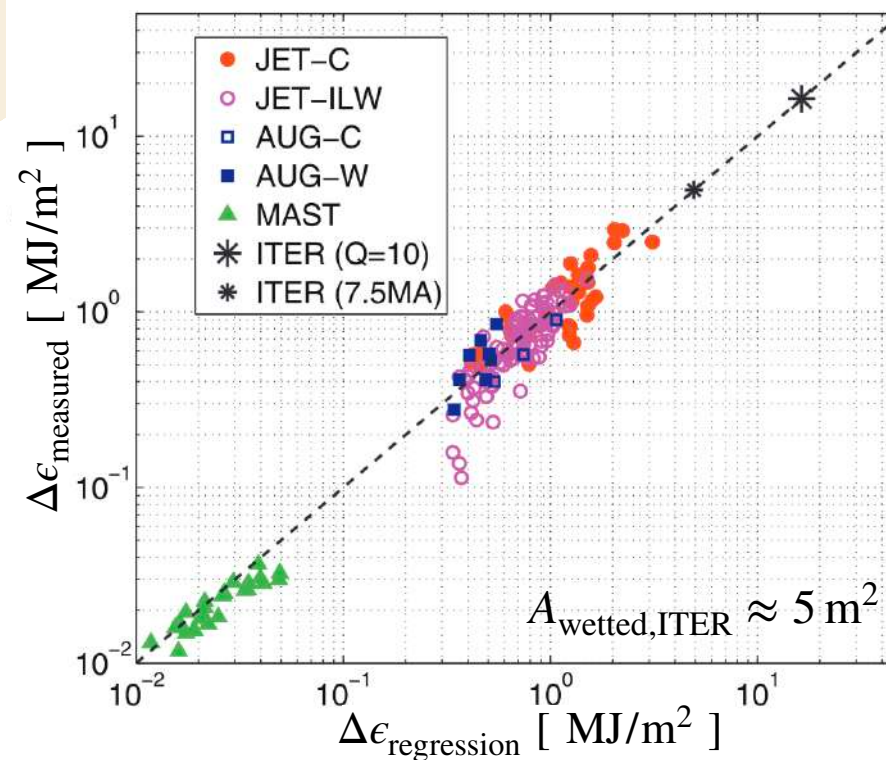


Fluxos de calor bem acima do suportável são observados durante ELMs em máquinas de grande porte e serão um problema no ITER

- Durante ELMs, o pico de fluxo de calor pode ultrapassar o limite tecnológico em uma ordem de magnitude
 - No ITER, fluxos de calor durante ELMs podem chegar à GW/m^2



Heat flux data from JET



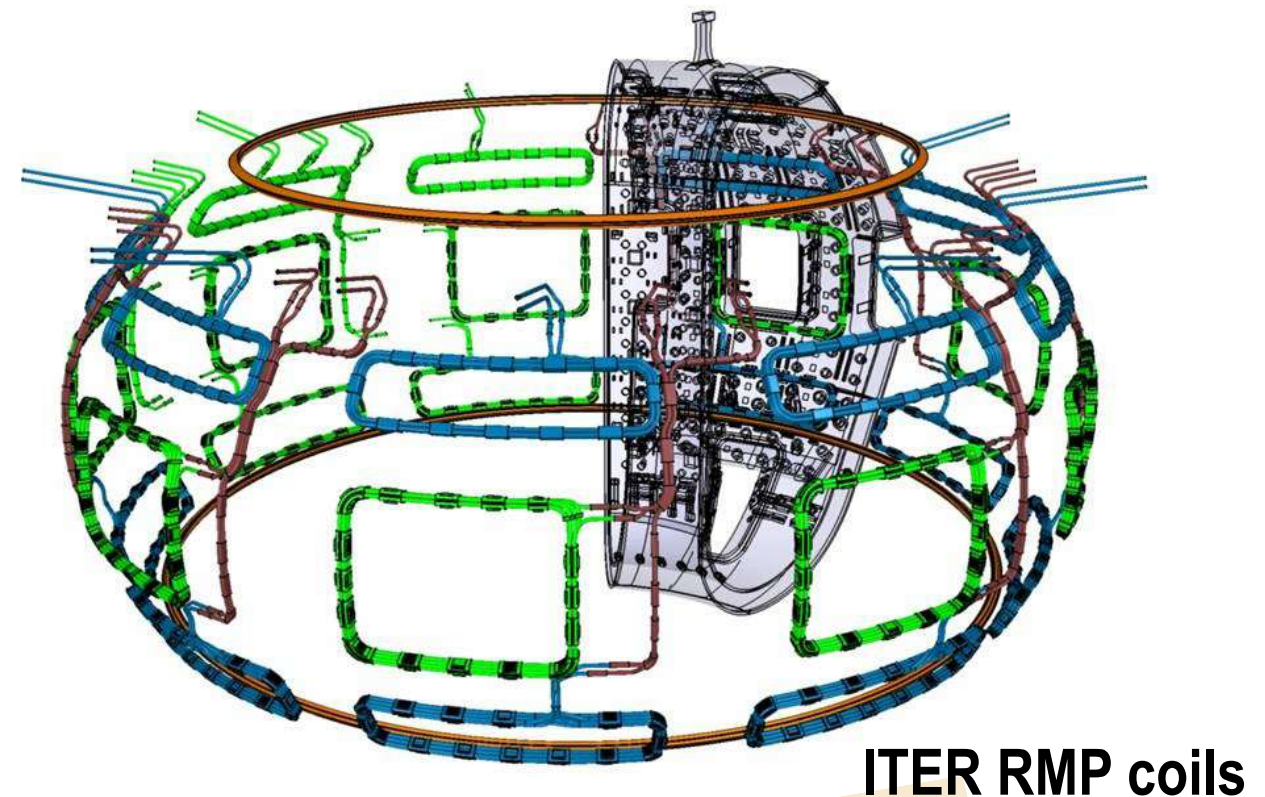
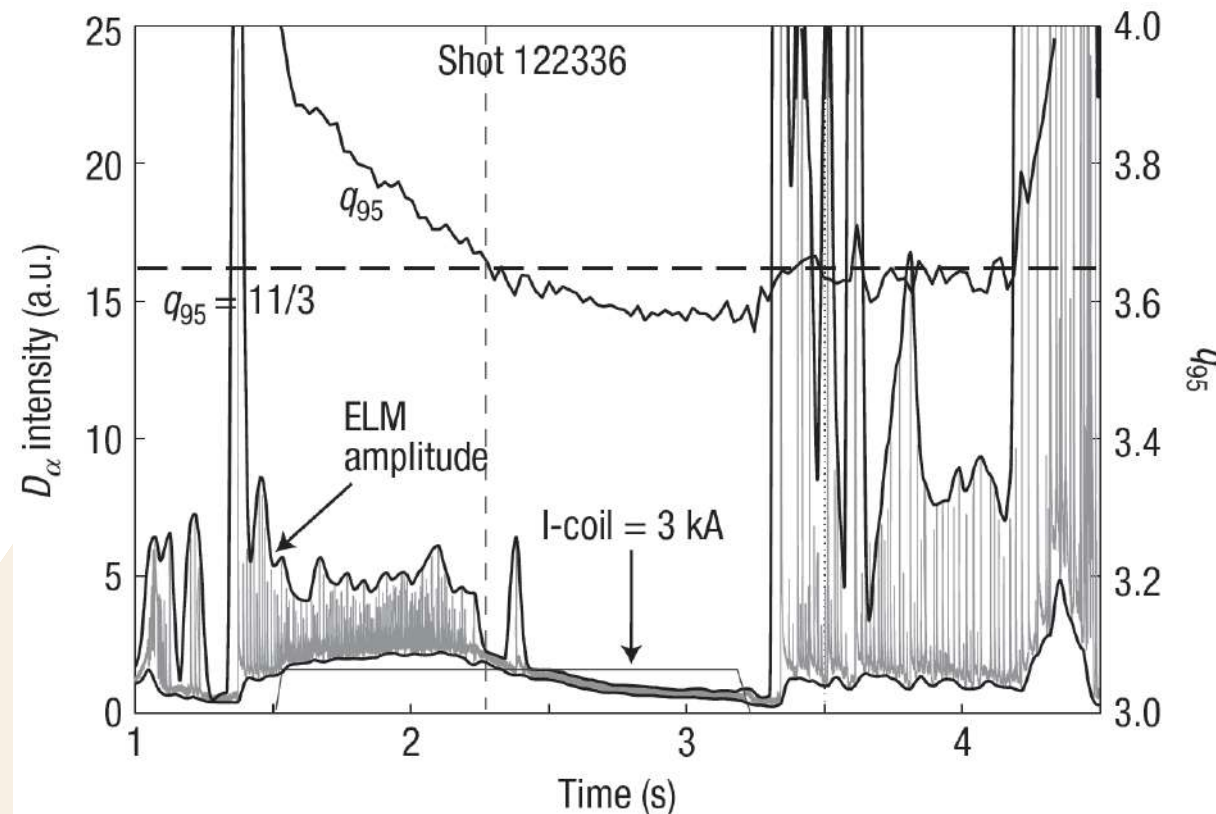
Fluxo de calor no ITER (Simulado)

O disparo de ELMs ainda é visto como um desafio científico e tecnológico

ELMs podem ser evitados através da aplicação de perturbações magnéticas ressonantes criadas por bobinas externas ao plasma

- Experimentos em várias máquinas ao redor do mundo mostraram que perturbações magnéticas ressonantes de baixa amplitude ($\delta B/B_0 \ll 0.1\%$) podem mitigar, ou até mesmo suprimir, ELMs

[T.E. Evans *et al.*, Nature **2** 419 (2006)]



Um modelo quantitativo e confiável da resposta de plasmas à campos RMP ainda não existe

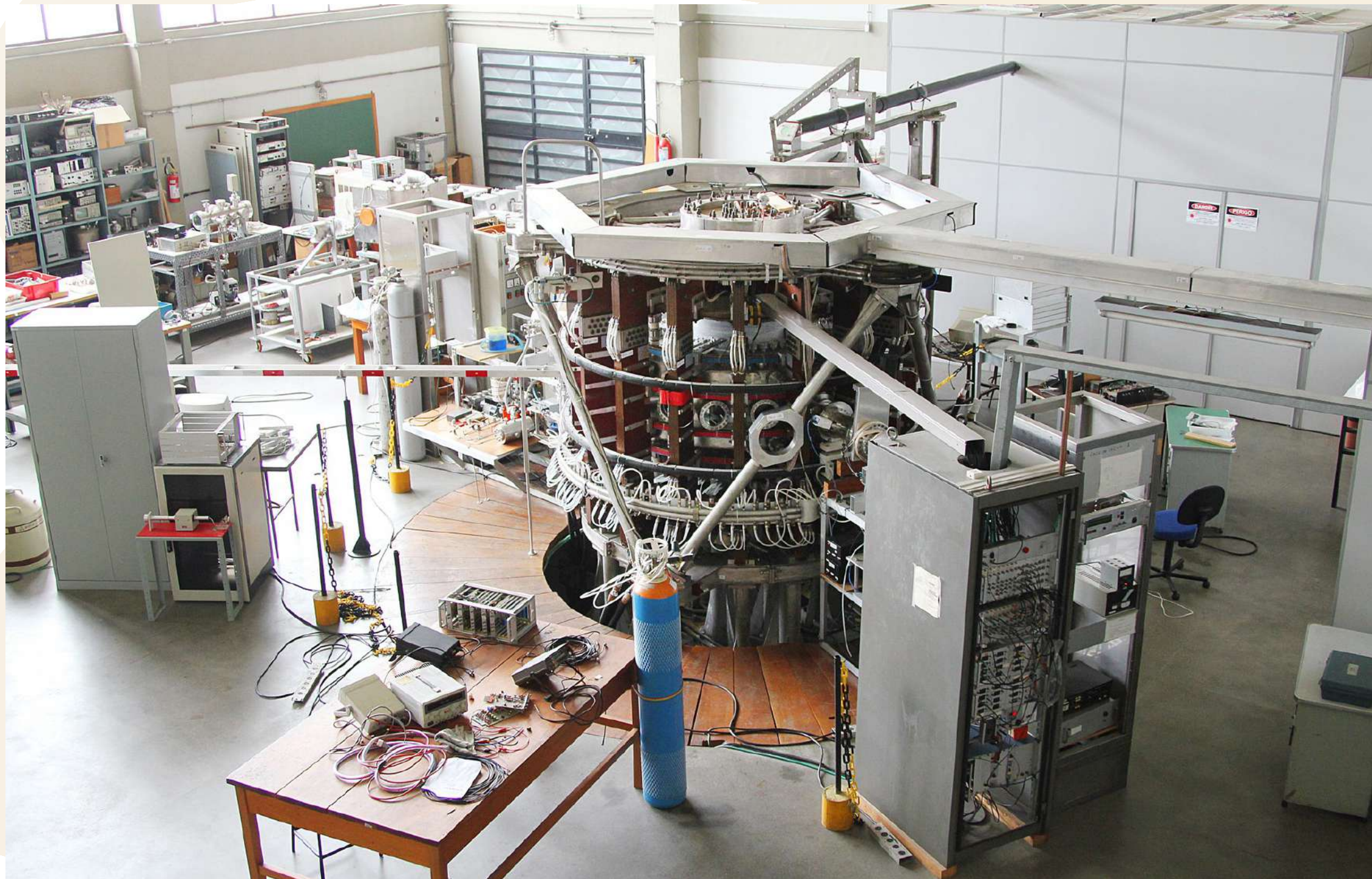
Modernização do tokamak TCABR para estudos de supressão de ELMs por campos RMP

- Os desafios científicos e tecnológicos associados ao disparo de ELMs
- **O modernização do TCABR**
 - O tokamak TCABR
 - Projeto e instalação de um conjunto inovador de bobinas RMP
 - Desenvolvimento de um sistema de controle de cenários de plasmas
 - Projeto e instalação de ladrilhos de grafite
 - Desenvolvimento de um sistema de injeção de helicidade
- **Resumo**

No Instituto de Física da USP, a pesquisa em fusão nuclear é realizada no Laboratório de Física de Plasmas

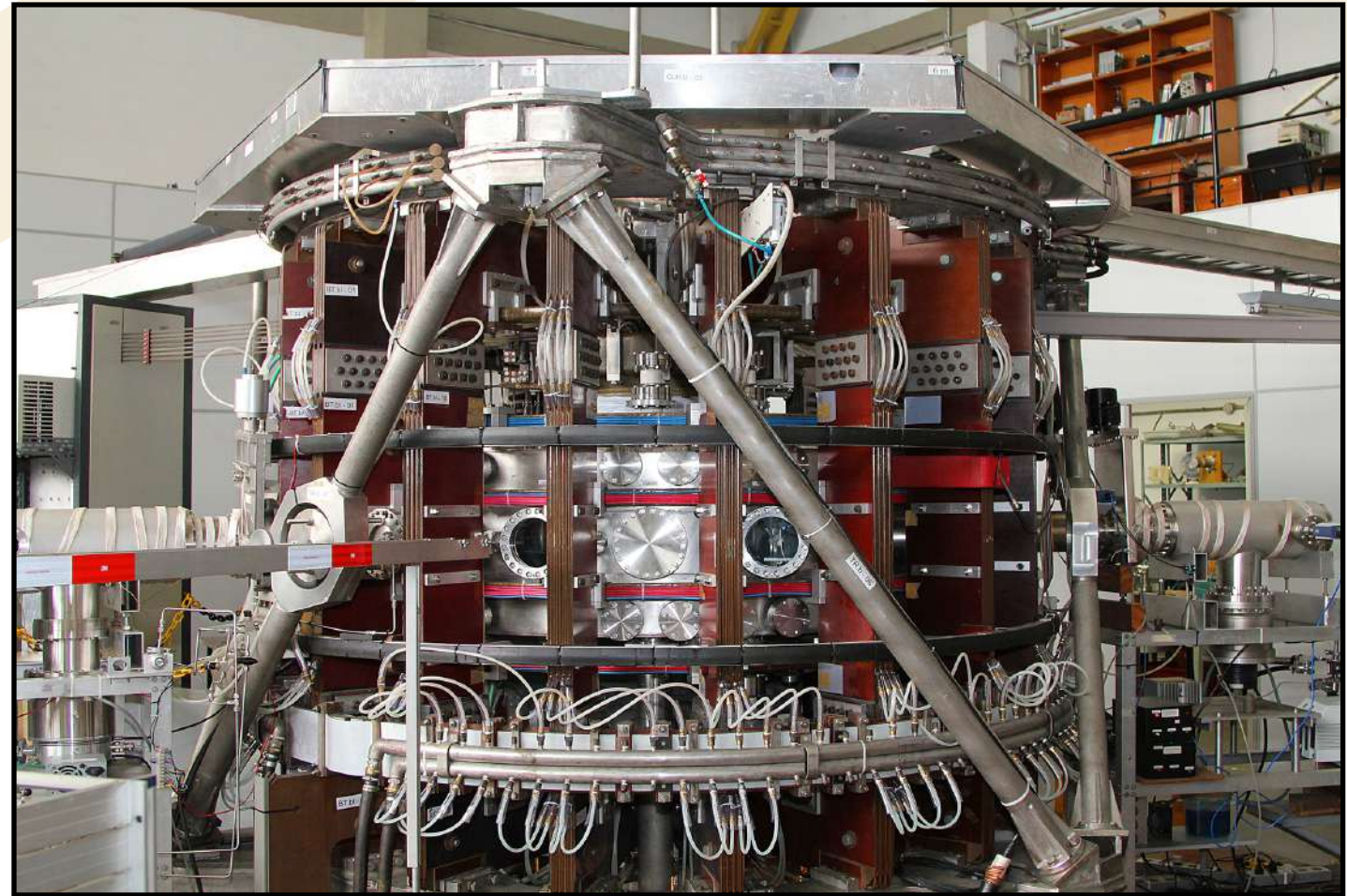


O Tokamak à Chauffage Alfvén Brésilien (TCABR) é uma máquina de pequeno porte operada pelo IFUSP



O Tokamak à Chauffage Alfvén Brésilien (TCABR) é uma máquina de pequeno porte operada pelo IFUSP

- O TCABR foi construído na Suíça e está em funcionamento no Laboratório de Física de Plasmas do IFUSP desde 1999
- O TCABR é uma máquina de pequeno porte
 - Raio maior: 0.62 m
 - Raio menor: 0.18 m
 - Corrente de plasma: 100 kA
 - Campo toroidal: 1.1 T
 - Duração da descarga: 100 ms
- Pesquisas realizadas no LFP
 - Turbulência e transporte anômalo
 - Regimes de confinamento melhorado
 - Acoplamento entre diferentes instabilidades magnetohidrodinâmicas (MHD)
 - Rotação intrínseca de plasmas

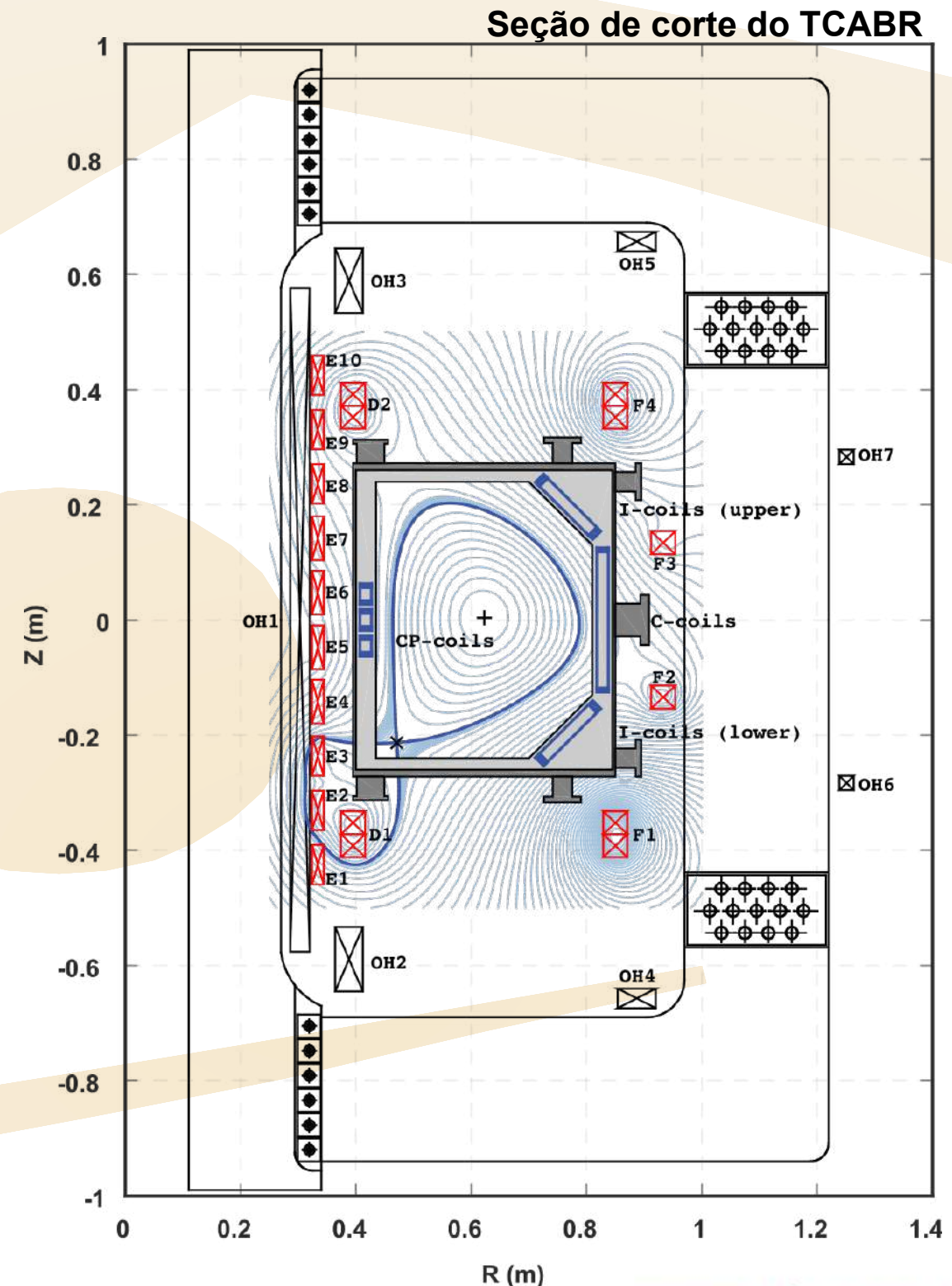
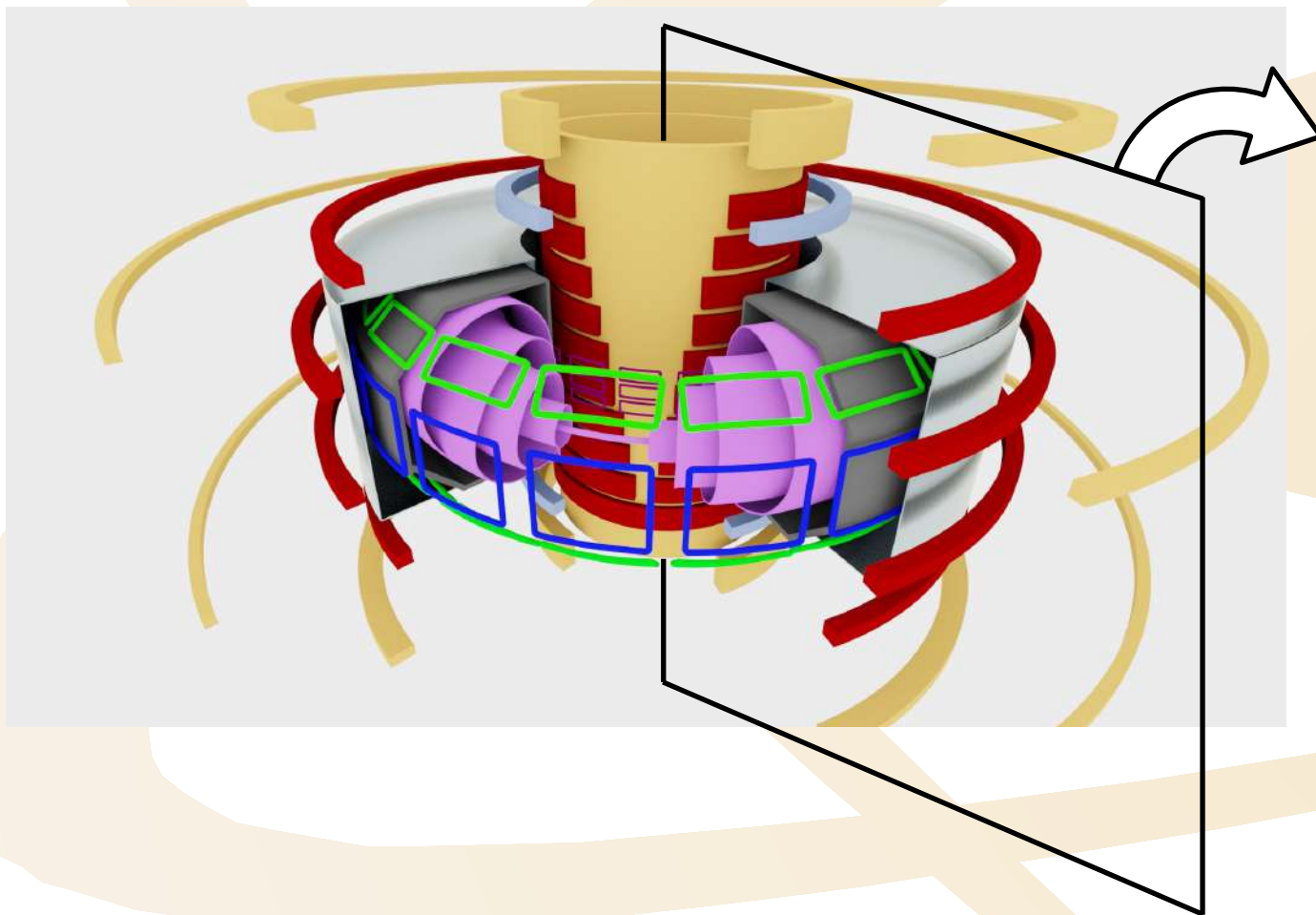


Modernização do tokamak TCABR para estudos de supressão de ELMs por campos RMP

- Os desafios científicos e tecnológicos associados ao disparo de ELMs
- **O modernização do TCABR**
 - O tokamak TCABR
 - Projeto e instalação de um conjunto inovador de bobinas RMP
 - Desenvolvimento de um sistema de controle de cenários de plasmas
 - Projeto e instalação de ladrilhos de grafite
 - Desenvolvimento de um sistema de injeção de helicidade
- **Resumo**

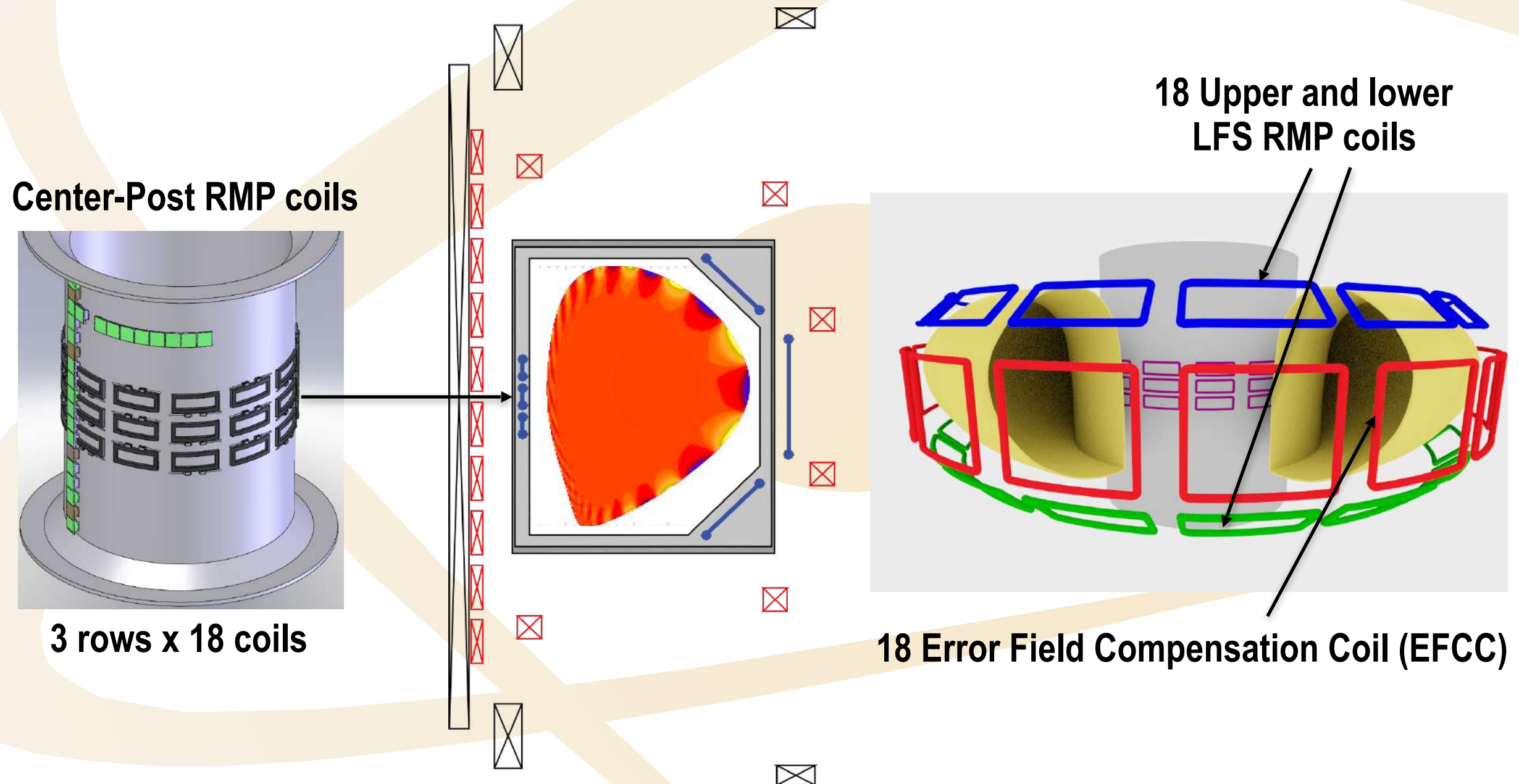
Um upgrade do TCABR está sendo projetado para permitir estudos sobre o impacto de perturbações magnéticas ressonantes em plasmas

- O TCABR possui um número relativamente alto de bobinas de campo poloidal
 - *Maior flexibilidade em controle de posição e formato do plasma*



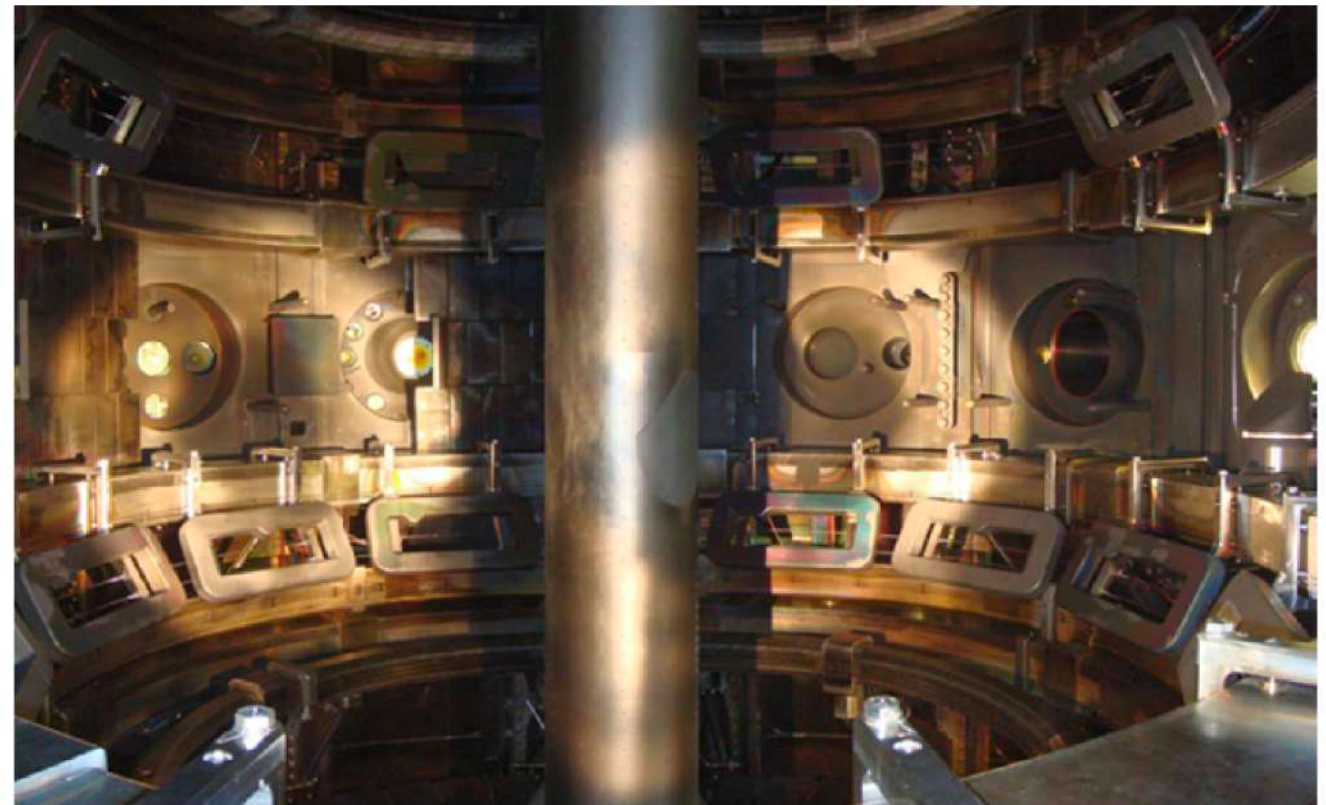
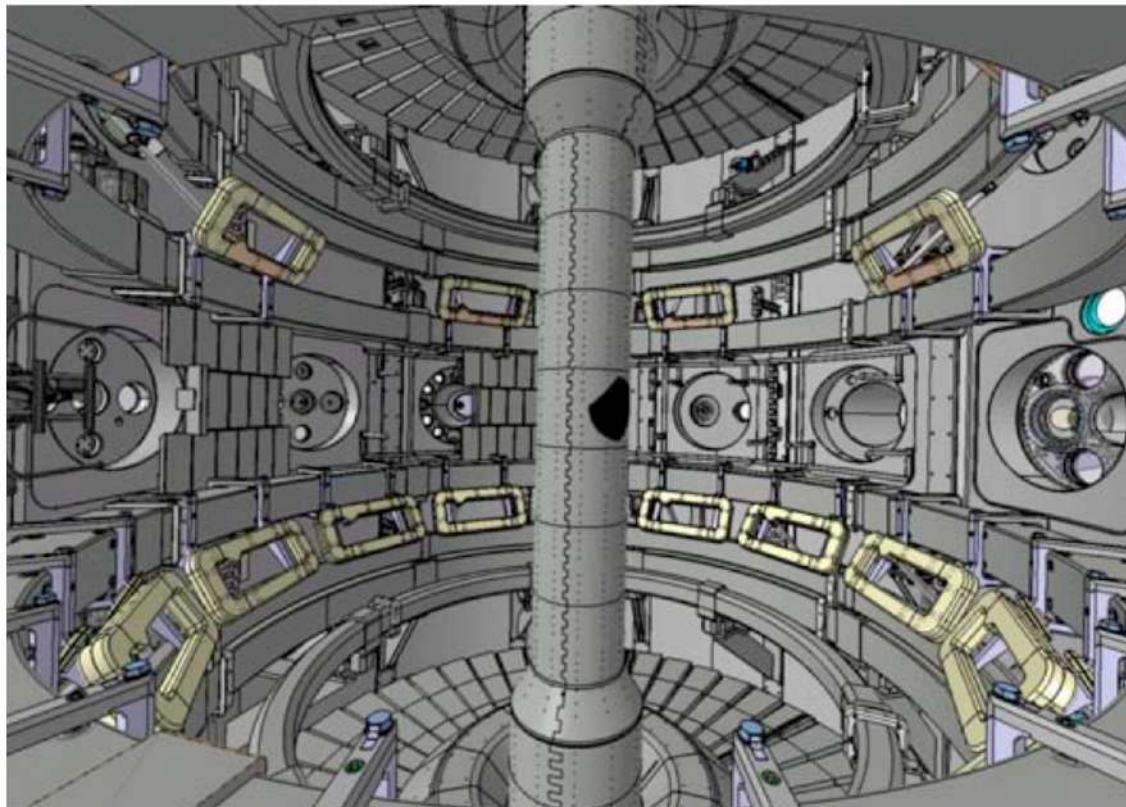
Um conjunto inovador de bobinas de campo ressonante permitirá uma validação detalhada de modelos físicos de plasmas

- O novo sistema de bobinas do TCABR possibilitará a realização de estudos sobre a supressão de *Edge Localized Modes* (ELMs)



Um conjunto inovador de bobinas de campo ressonante permitirá uma validação detalhada de modelos físicos de plasmas

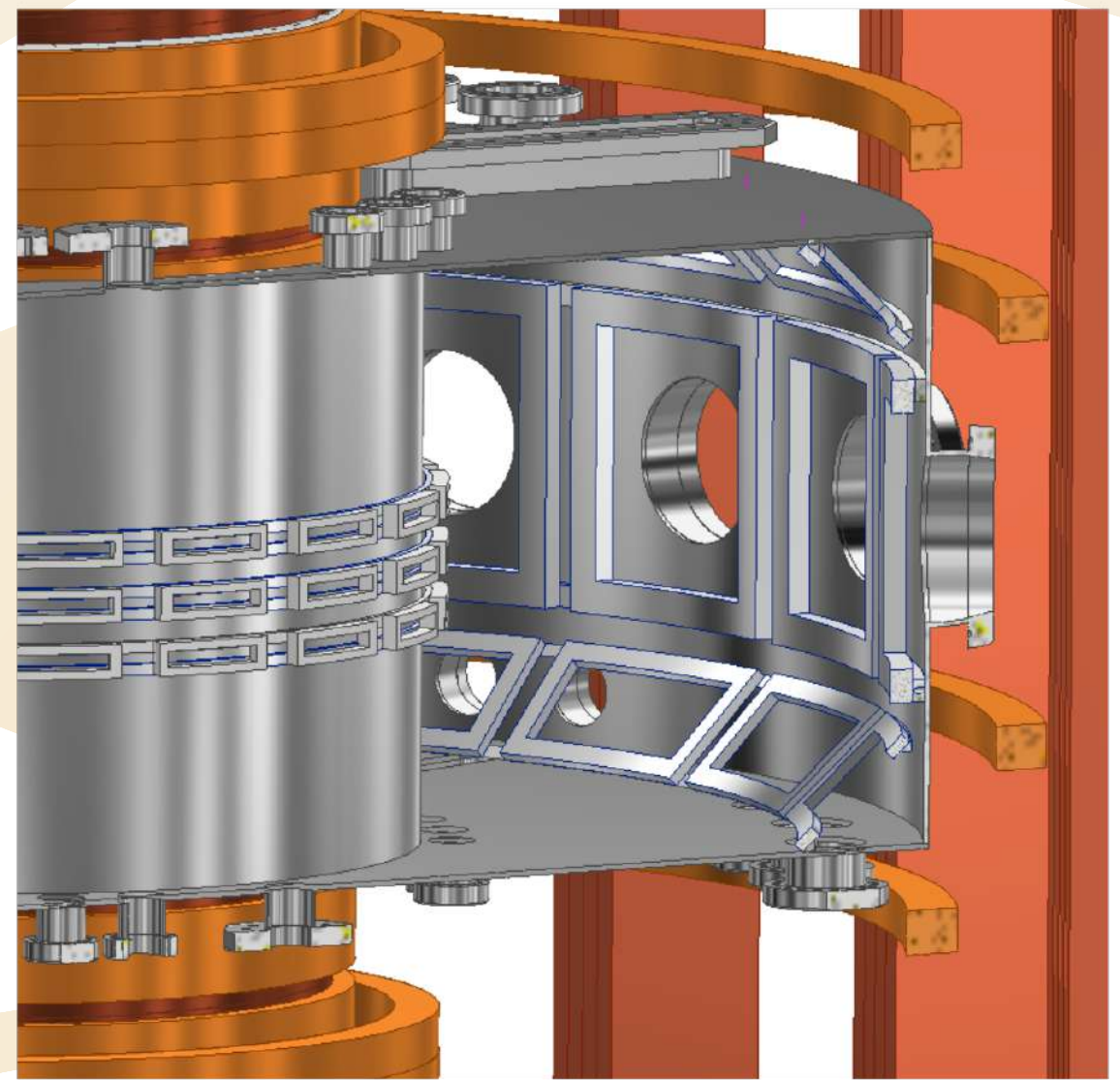
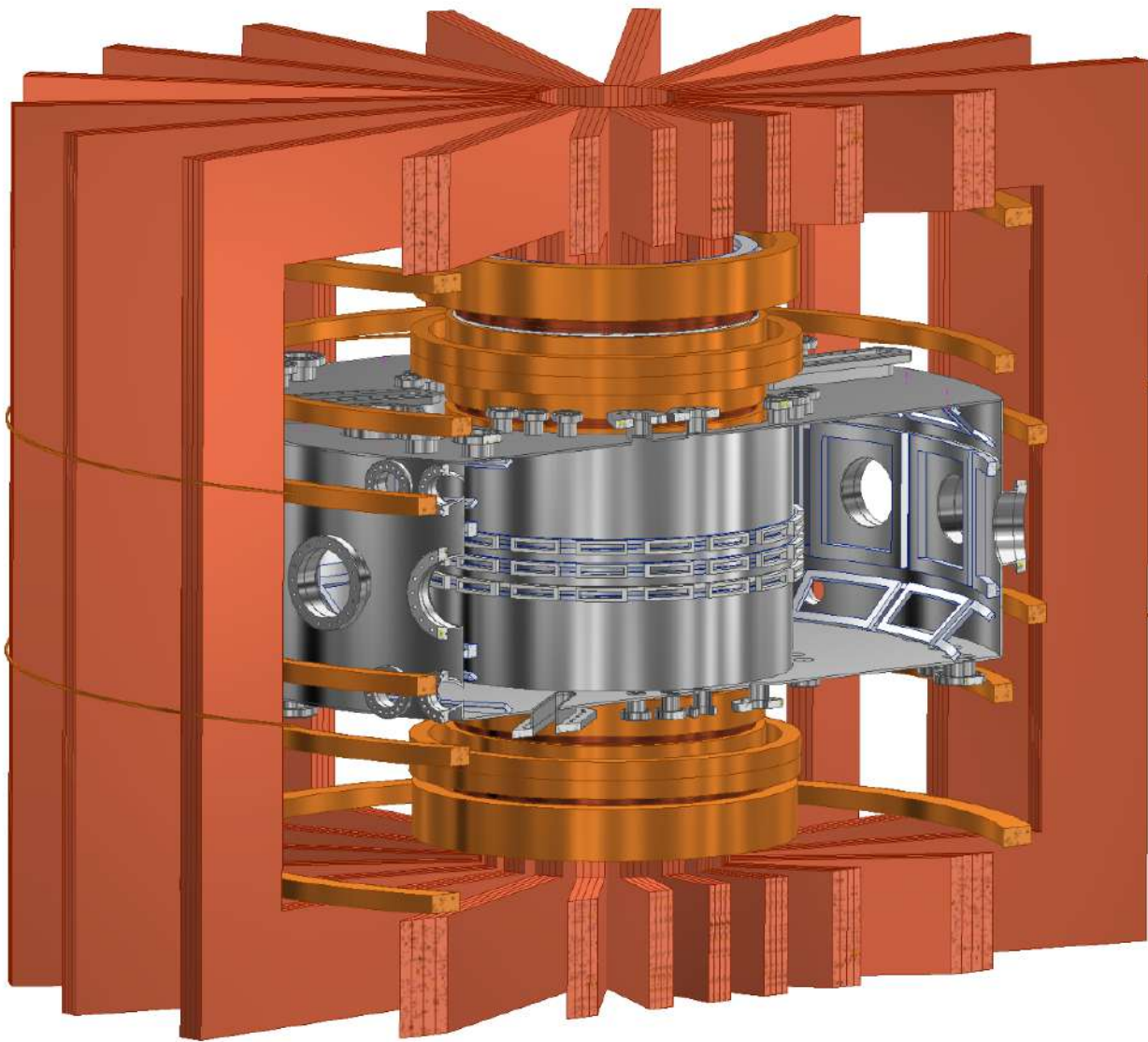
- O novo sistema de bobinas do TCABR possibilitará a realização de estudos sobre a supressão de *Edge Localized Modes* (ELMs)



- O MAST é um tokamak esférico localizado na Inglaterra
 - O MAST possui 18 bobinas no interior da câmara de vácuo (6 na parte superior e 12 na parte inferior)

Um conjunto inovador de bobinas de campo ressonante permitirá uma validação detalhada de modelos físicos de plasmas

- O novo sistema de bobinas do TCABR possibilitará a realização de estudos sobre a supressão de *Edge Localized Modes* (ELMs)



O TCABR terá 6 grupos de bobinas, onde cada grupo terá 18 bobinas (total de 108 bobinas)

Fontes de potência de alto desempenho permitirão aplicar campos RMP com características únicas no mundo

- **As 108 bobinas RMP serão alimentadas independentemente**
 - *Isso permitirá a criação de campo RMP de grande variedade de geometrias e espectro, com números de modo toroidal até $n = 9$*
- **As bobinas RMP serão instaladas dentro da câmara de vácuo para permitir a aplicação de campos RMP girantes**
 - *As fontes de potência fornecerão correntes DC e AC (até 10 kHz)*
 - *A topologia eletrônica das fontes será baseada em um conversor estático em multi-nível (estado-da-arte)*
- **Existem vários desafios tecnológicos associados à construção das bobinas RMP**
 - *Alta corrente (DC: 2 kA; AC: 1kA)*
 - *Alta tensão (4 kV)*
 - *Alta temperatura (200 °C)*
 - *Alto vácuo (5×10^{-7} mbar)*
 - *Grandes forças mecânicas (10 kN)*

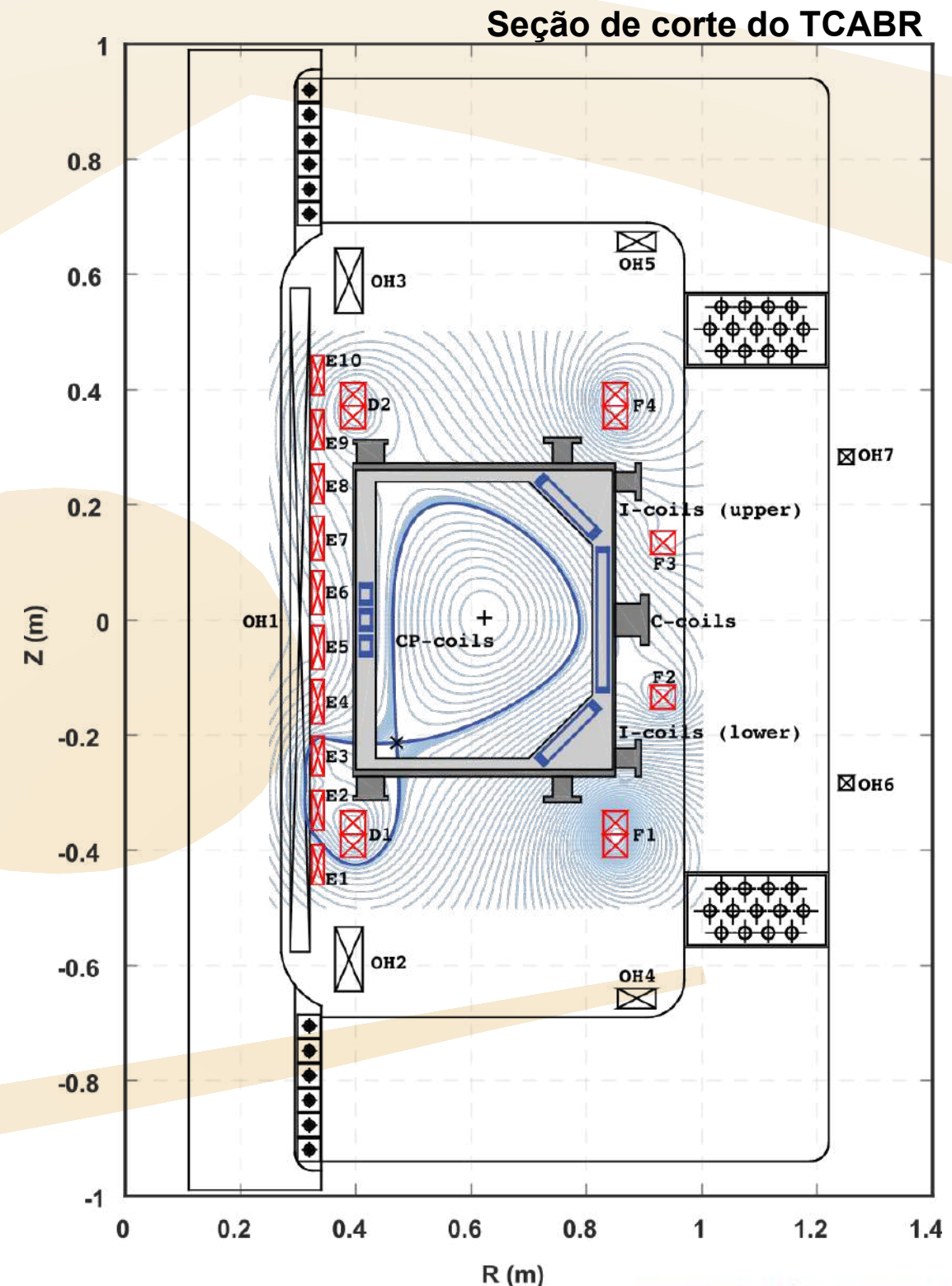
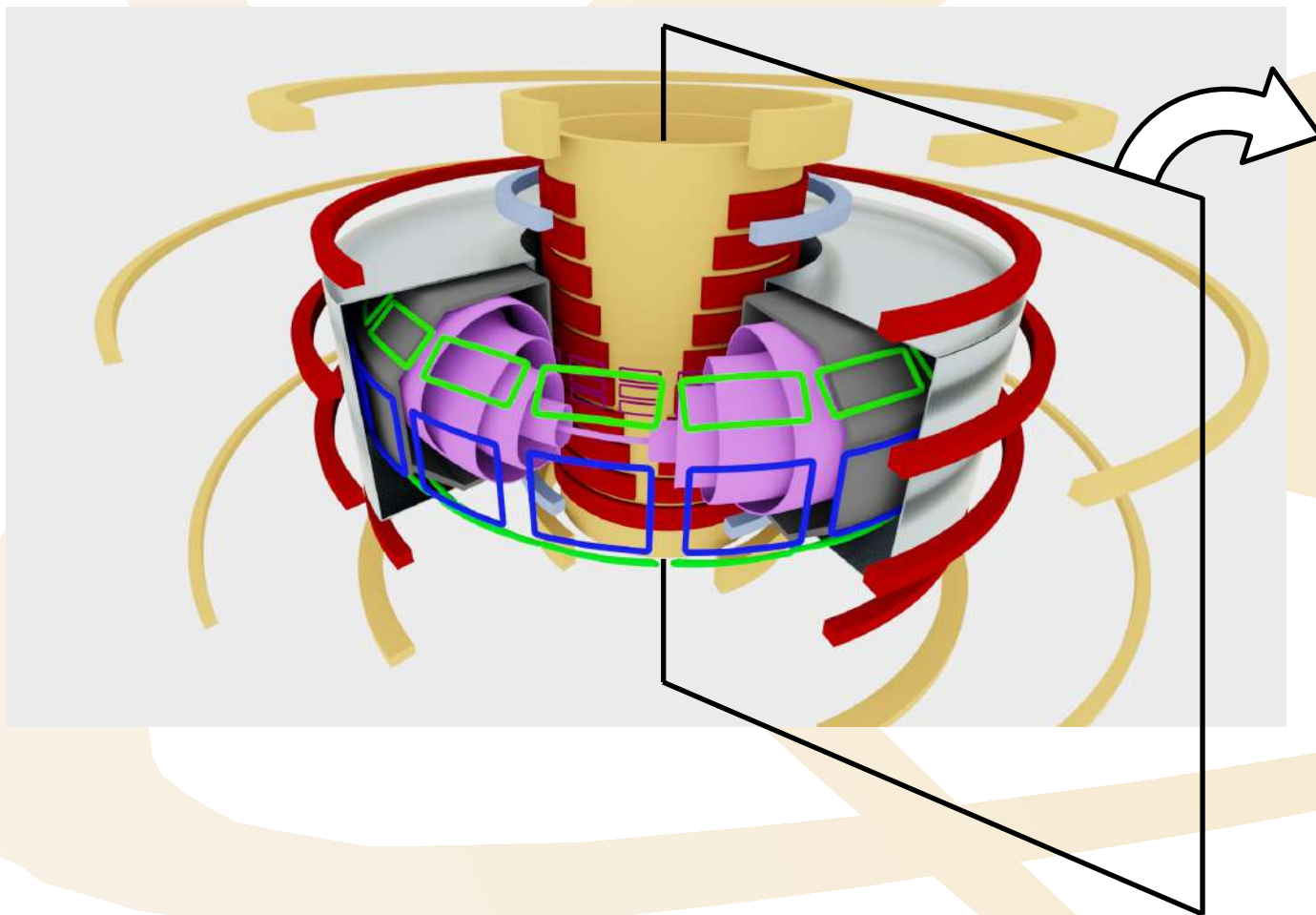
Uma falha mecânica pode ser catastrófica

Modernização do tokamak TCABR para estudos de supressão de ELMs por campos RMP

- Os desafios científicos e tecnológicos associados ao disparo de ELMs
- **O modernização do TCABR**
 - O tokamak TCABR
 - Projeto e instalação de um conjunto inovador de bobinas RMP
 - Desenvolvimento de um sistema de controle de cenários de plasmas
 - Projeto e instalação de ladrilhos de grafite
 - Desenvolvimento de um sistema de injeção de helicidade
- **Resumo**

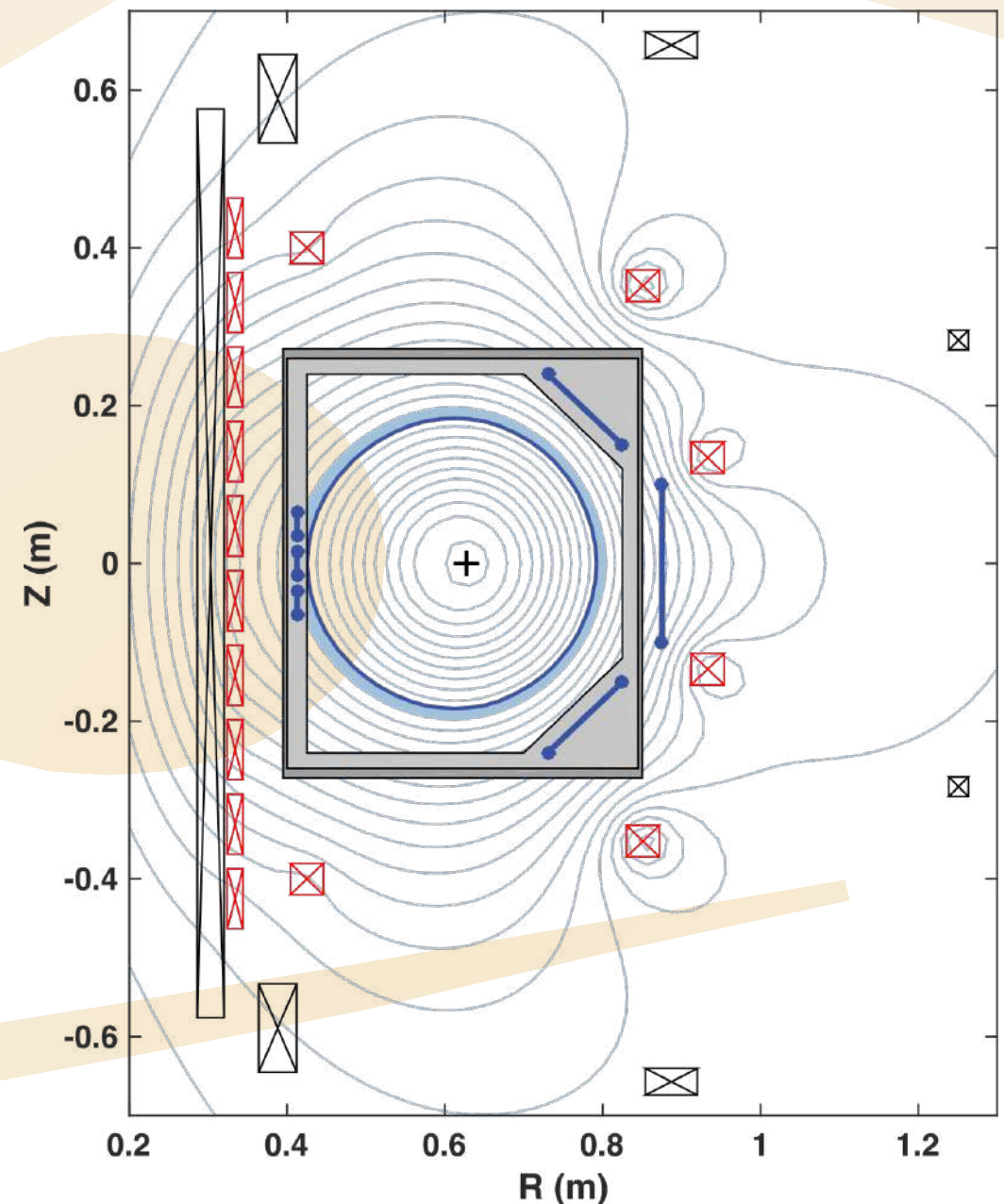
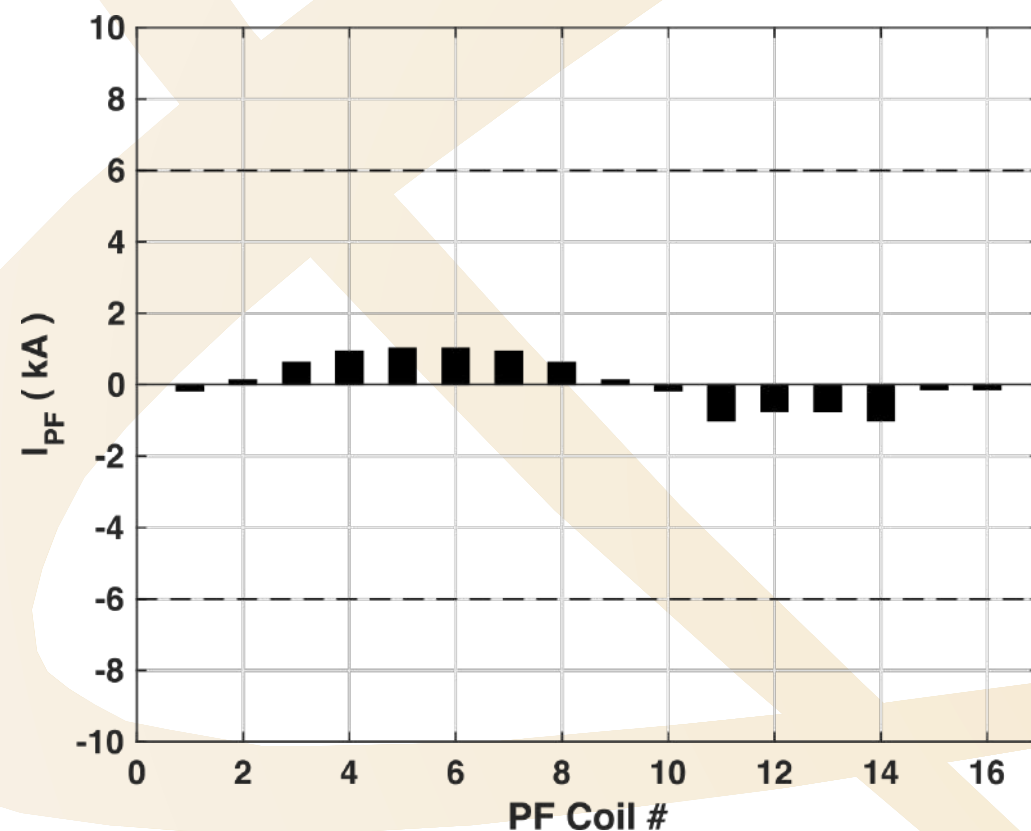
O upgrade do TCABR permitirá estudos sobre o impacto de perturbações magnéticas ressonantes em plasmas em várias cenários de plasma

- O TCABR possui um número relativamente alto de bobinas de campo poloidal
 - *Maior flexibilidade em controle de posição e formato do plasma*



Um novo sistema de controle de plasma está sendo desenvolvido para permitir a criação de uma variedade de cenários de plasma

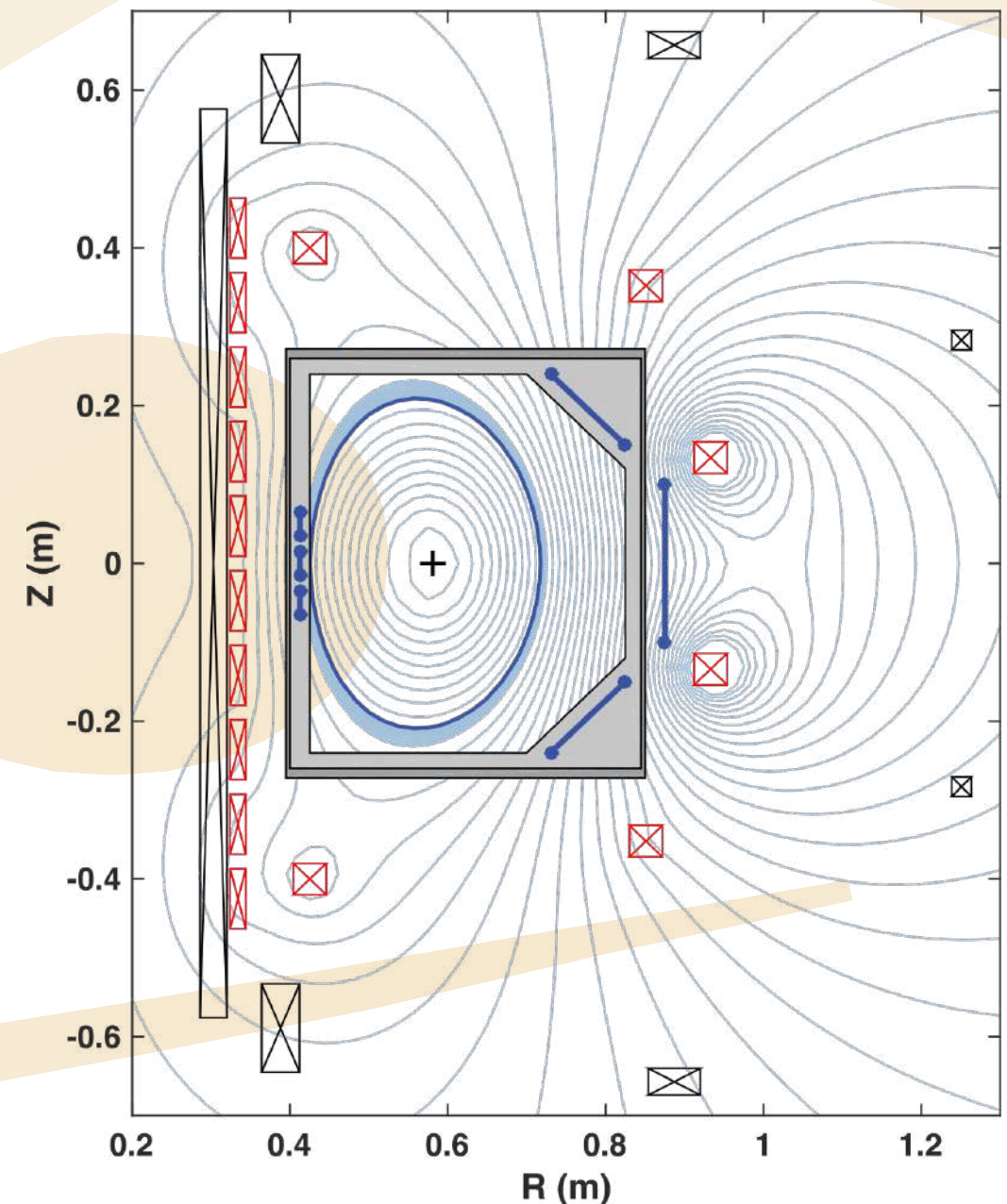
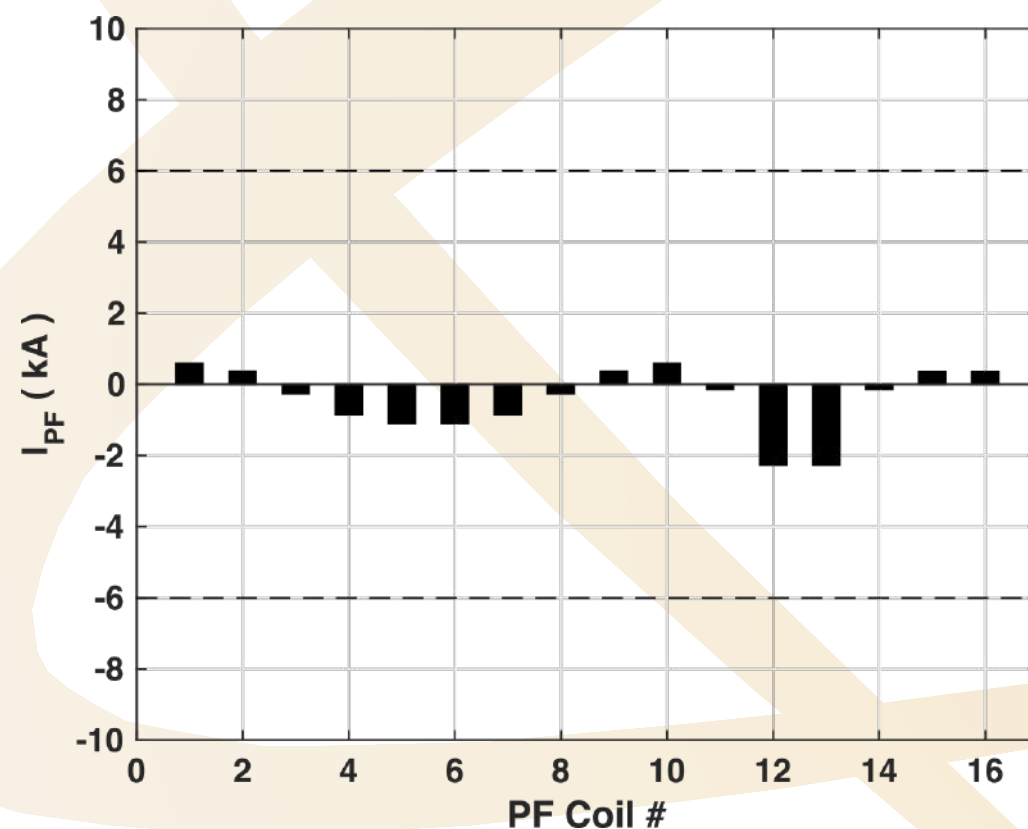
- Várias configurações de plasma estão previstas para o TCABR
 - Circular



Um novo sistema de controle de plasma está sendo desenvolvido para permitir a criação de uma variedade de cenários de plasma

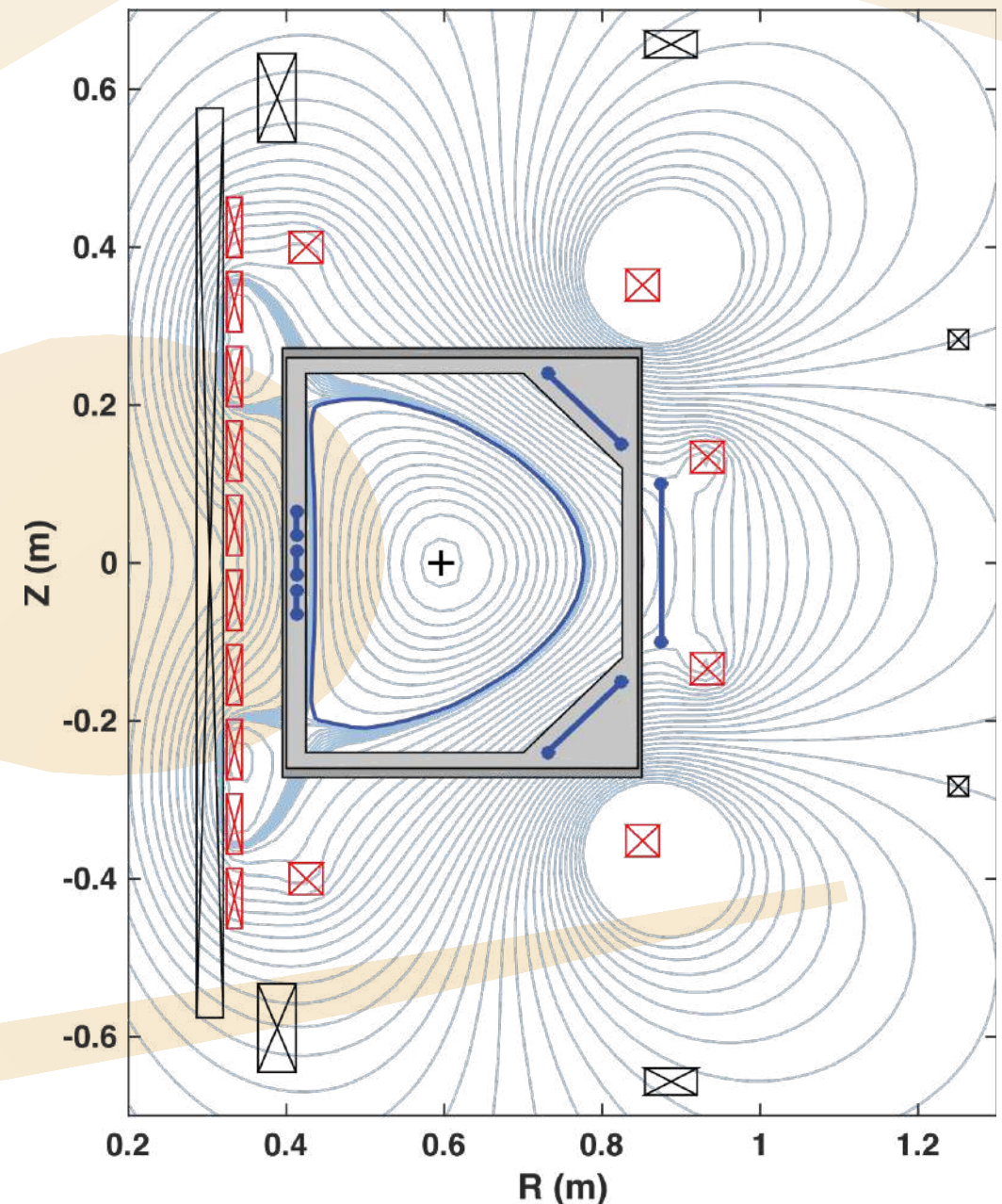
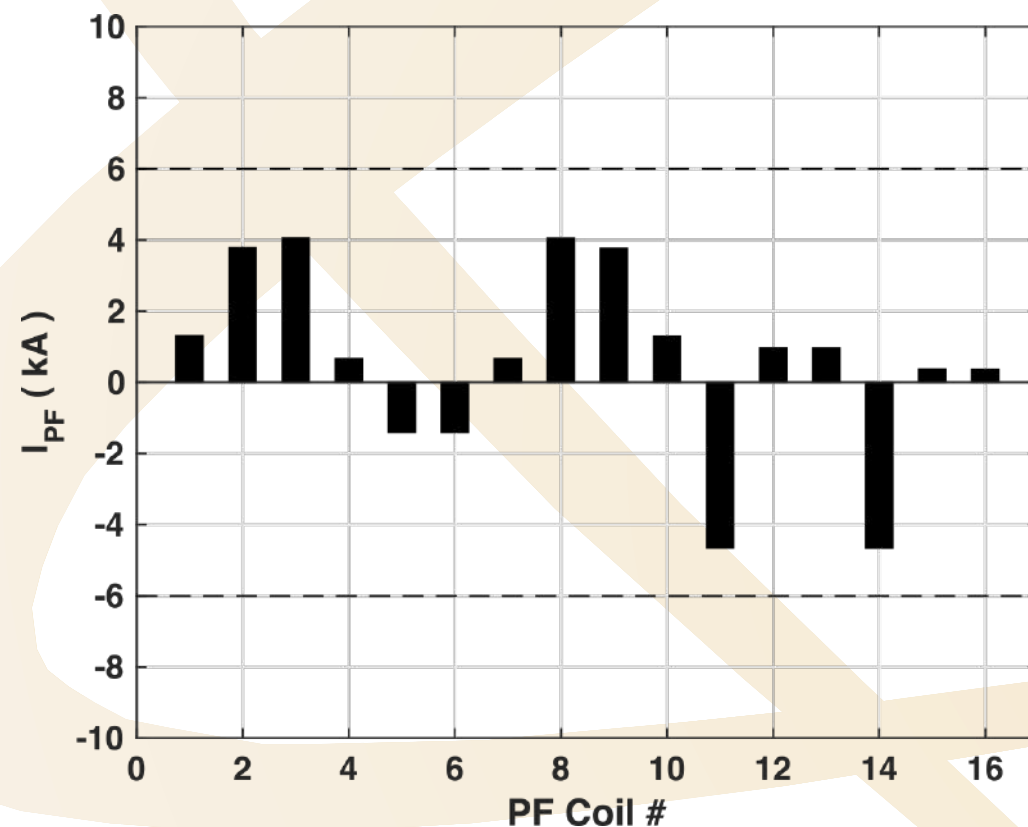
- **Várias configurações de plasma estão previstas para o TCABR**

- Alongado ($\kappa < 1.45$)
 - + Melhor confinamento de energia
 - + Necessita de um sistema de controle de posição vertical robusto



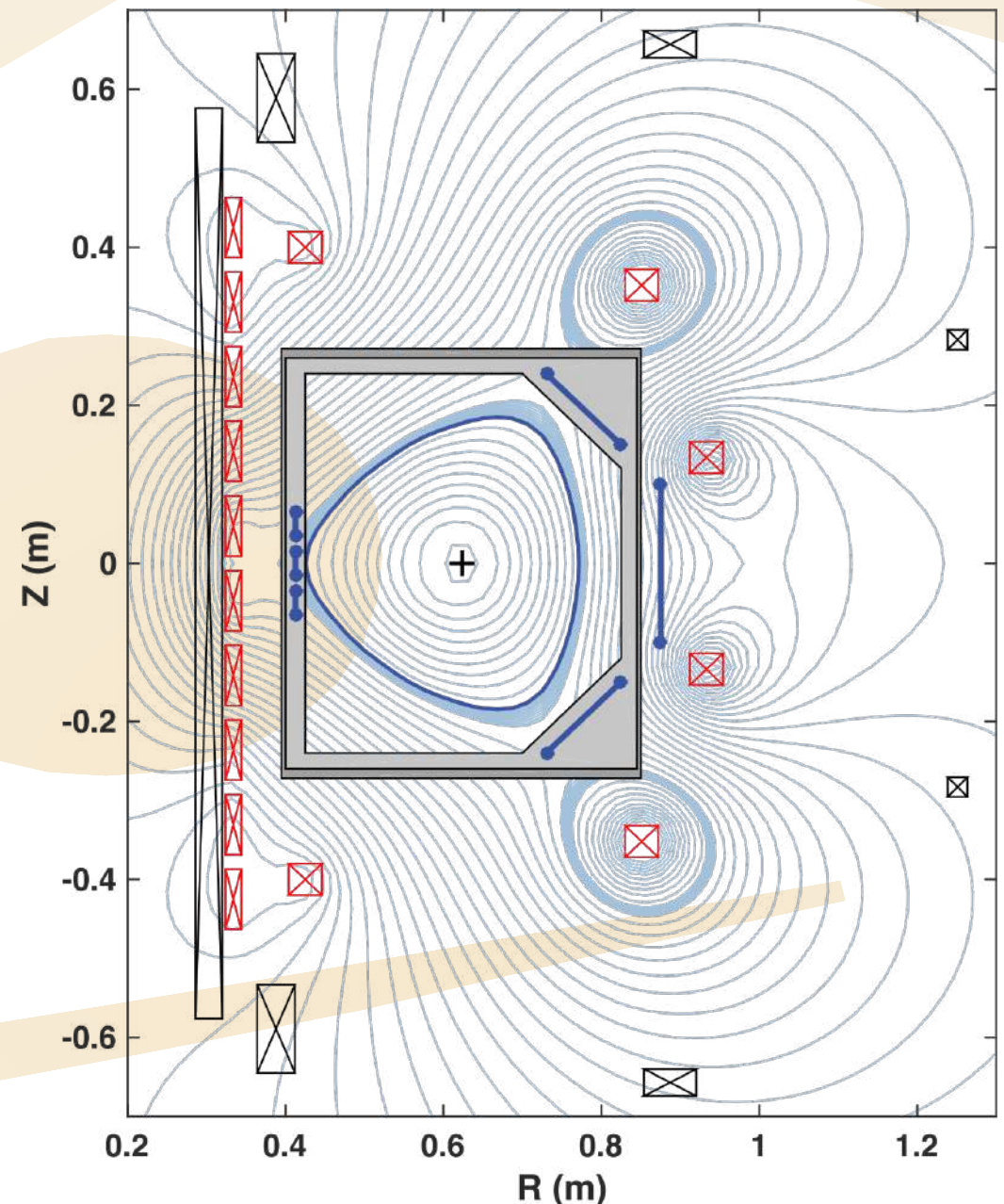
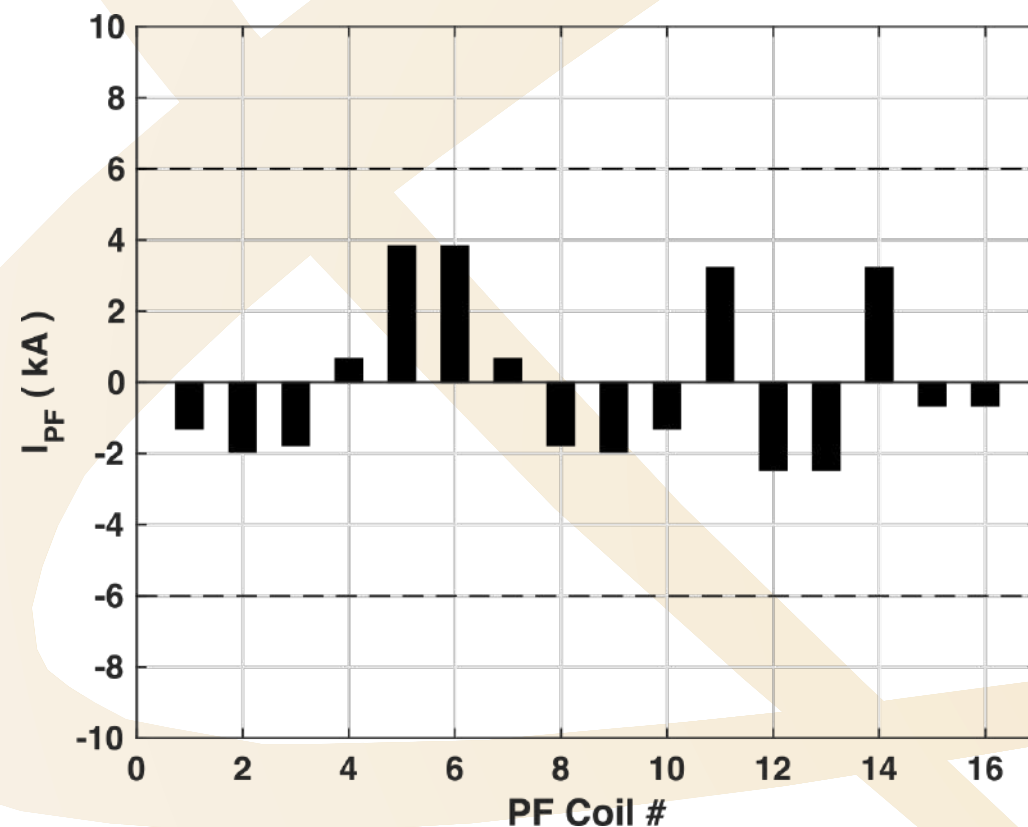
Um novo sistema de controle de plasma está sendo desenvolvido para permitir a criação de uma variedade de cenários de plasma

- Várias configurações de plasma estão previstas para o TCABR
 - Triangularidade positiva ($|\delta| < 1.50$)
 - + Melhor estabilidade MHD



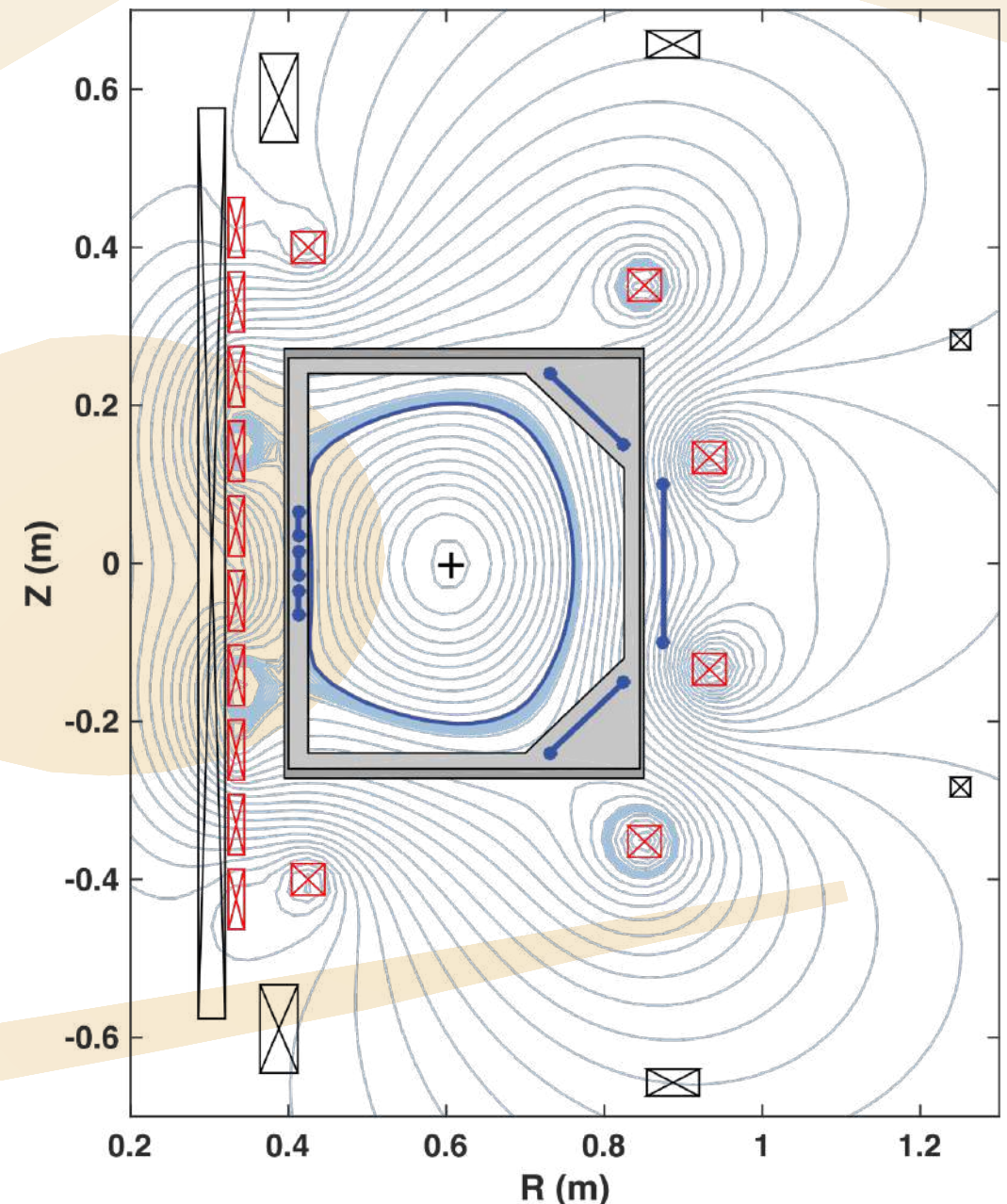
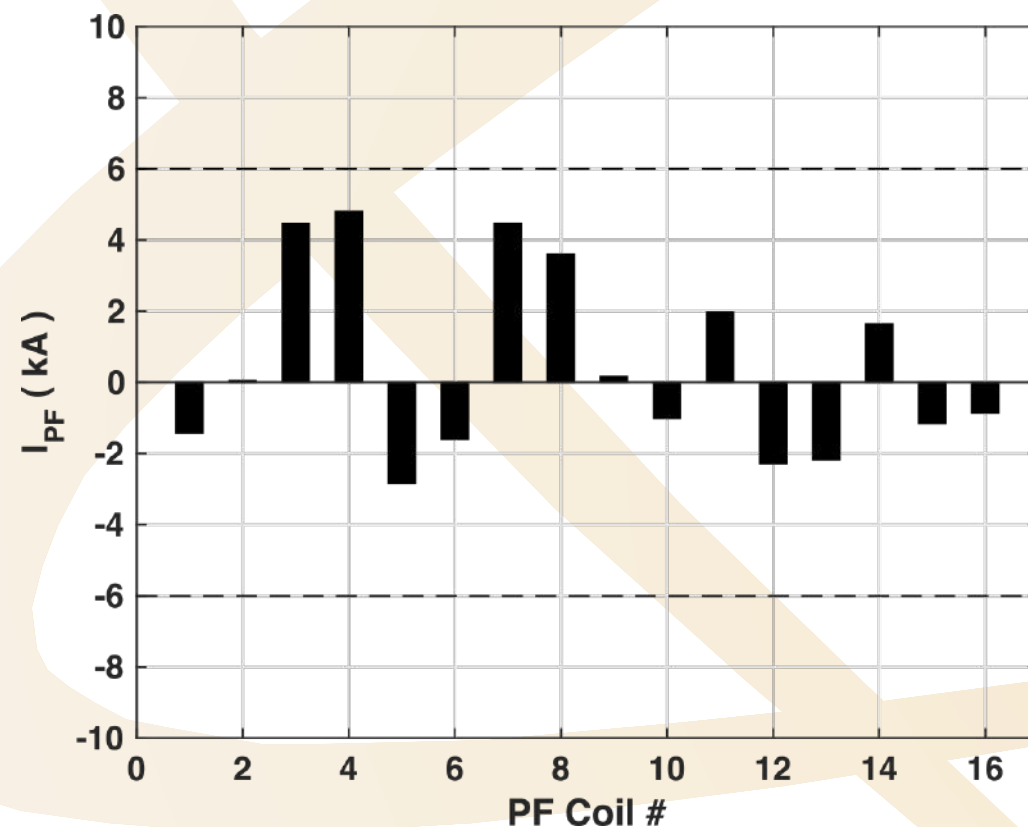
Um novo sistema de controle de plasma está sendo desenvolvido para permitir a criação de uma variedade de cenários de plasma

- Várias configurações de plasma estão previstas para o TCABR
 - Triangularidade Negativa ($|\delta| < 1.50$)
 - + Transporte reduzido



Um novo sistema de controle de plasma está sendo desenvolvido para permitir a criação de uma variedade de cenários de plasma

- Várias configurações de plasma estão previstas para o TCABR
 - Quadratura ($\zeta < 1.0$)
 - + Estabilidade de borda melhorada

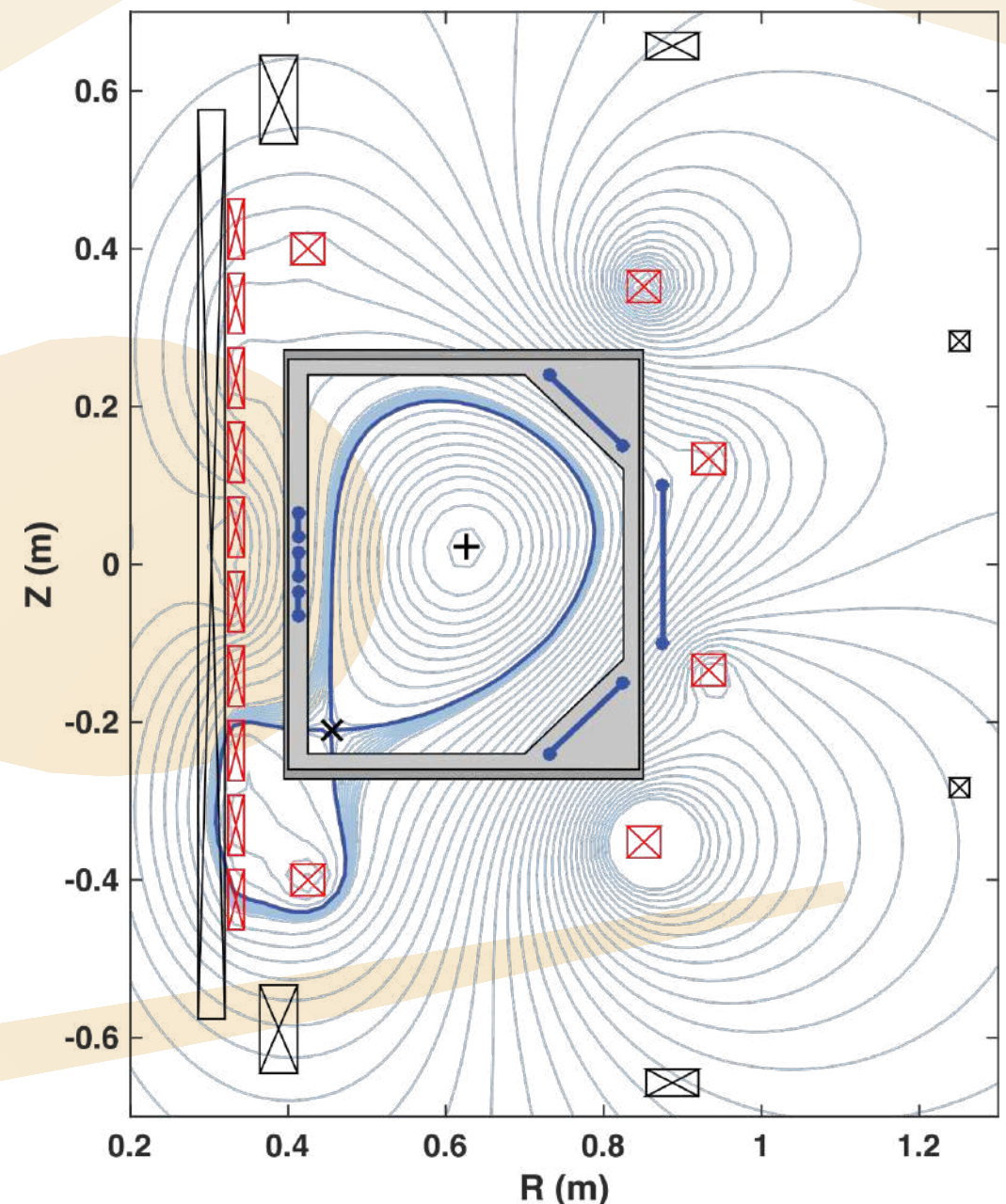
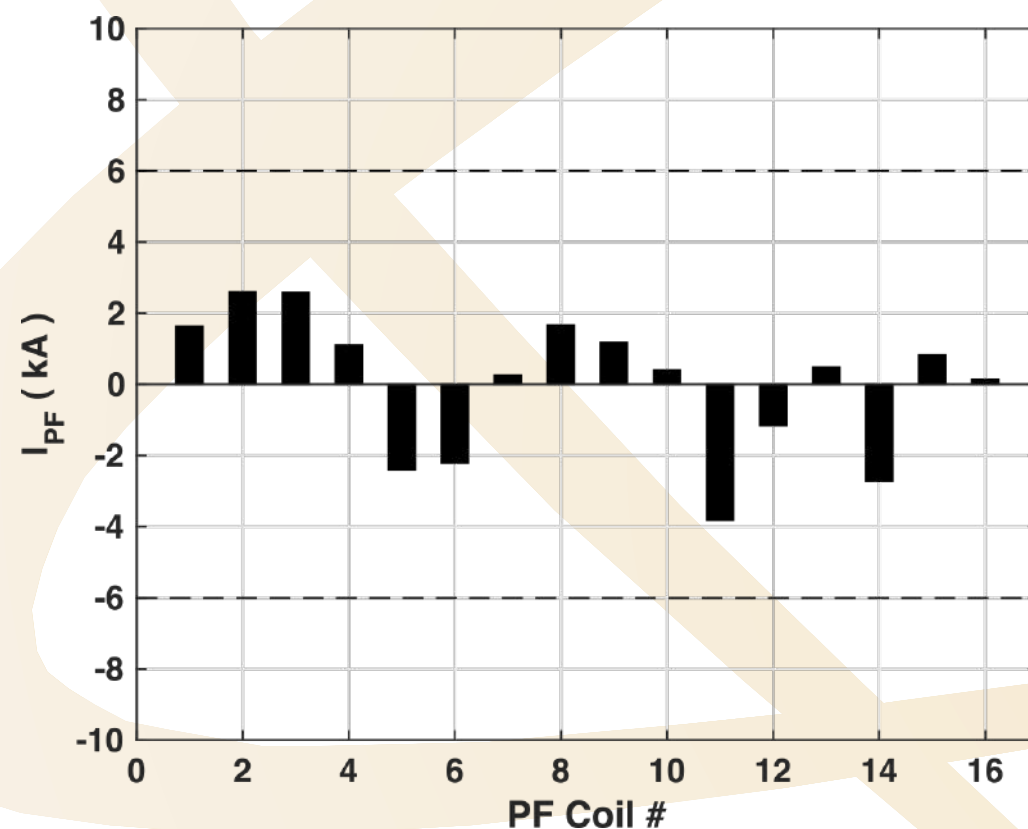


Um novo sistema de controle de plasma está sendo desenvolvido para permitir a criação de uma variedade de cenários de plasma

- **Várias configurações de plasma estão previstas para o TCABR**

- *Configuração de plasma com ponto X*

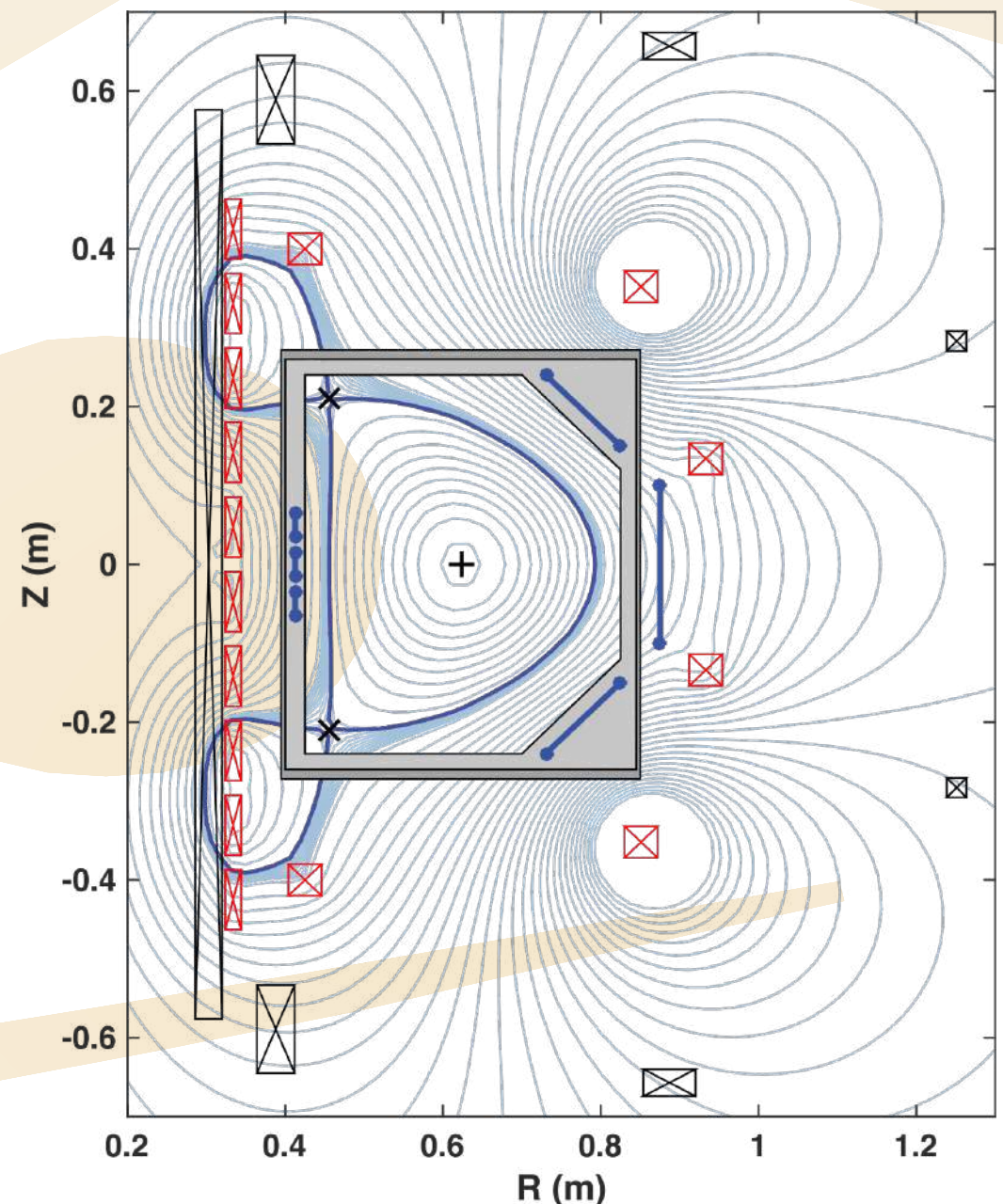
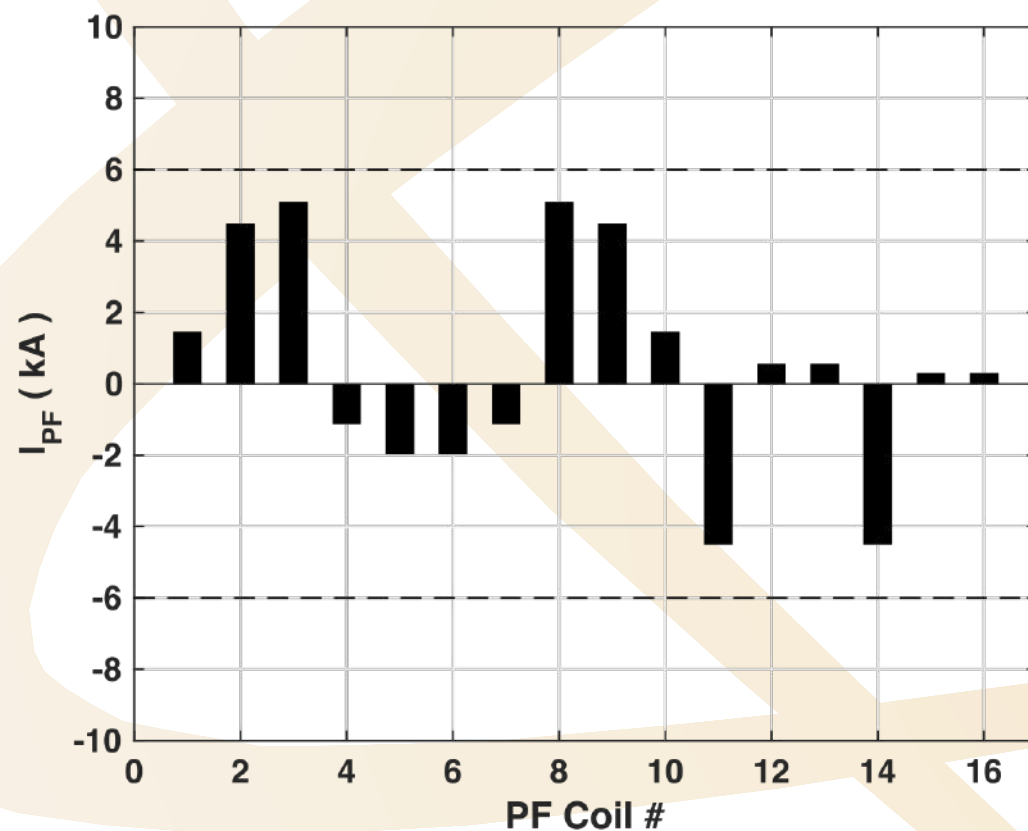
- + Menor contaminação por impurezas
 - + Melhor confinamento de energia
 - + Acesso ao modo-H facilitado



Um novo sistema de controle de plasma está sendo desenvolvido para permitir a criação de uma variedade de cenários de plasma

- **Várias configurações de plasma estão previstas para o TCABR**

- Configuração com ponto-X duplo
 - + Atrativa para validação de códigos de resposta de plasma à campos RMP

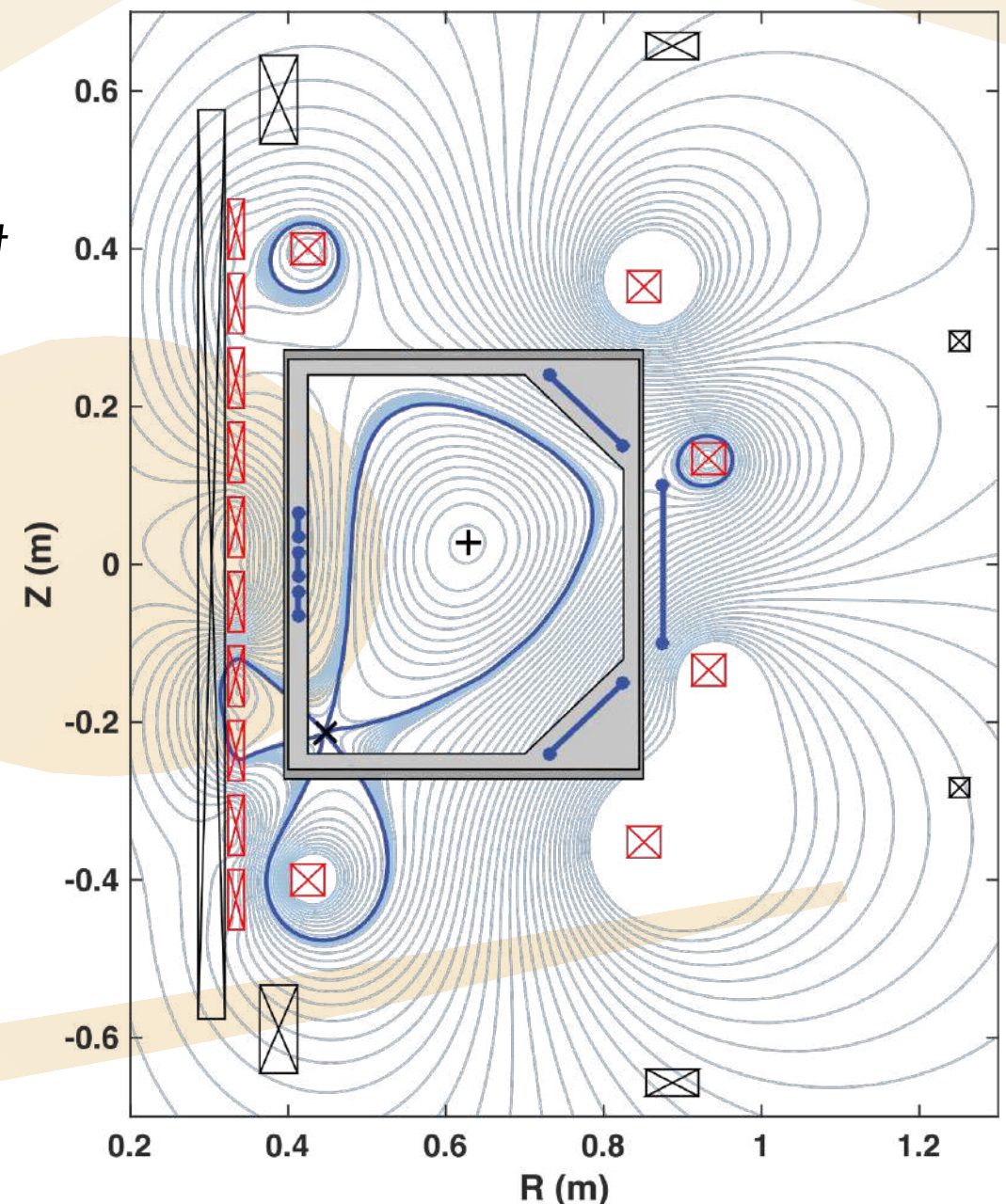
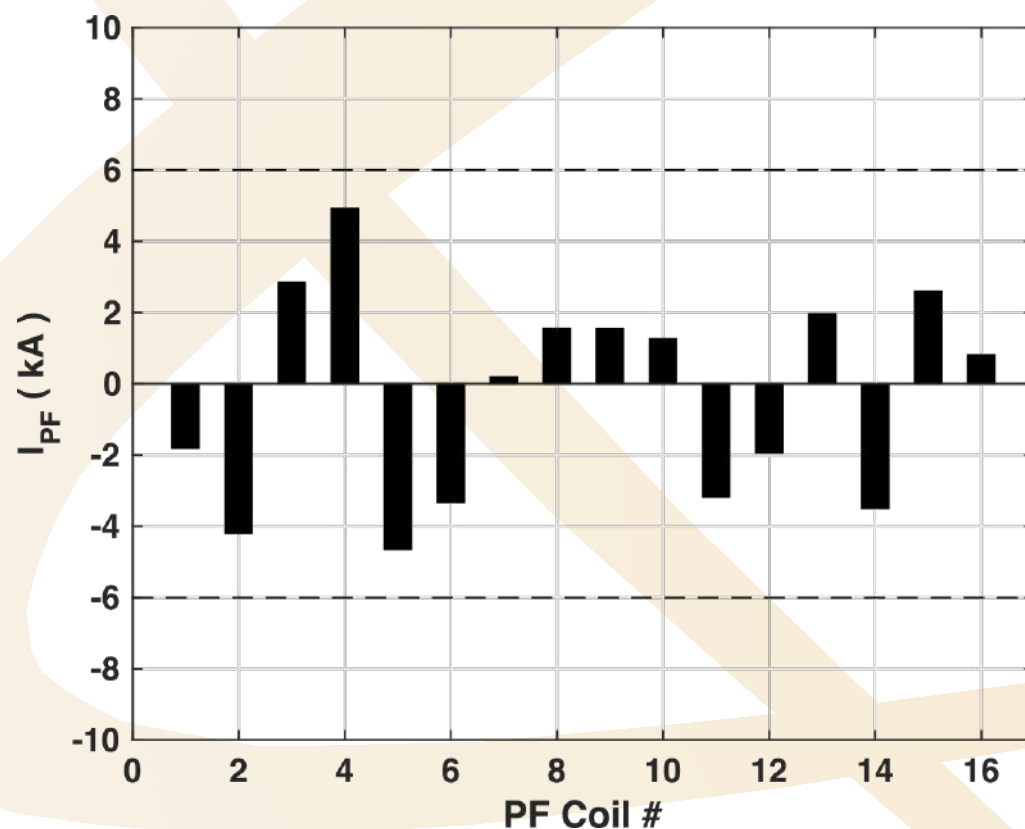


Um novo sistema de controle de plasma está sendo desenvolvido para permitir a criação de uma variedade de cenários de plasma

- **Várias configurações de plasma estão previstas para o TCABR**

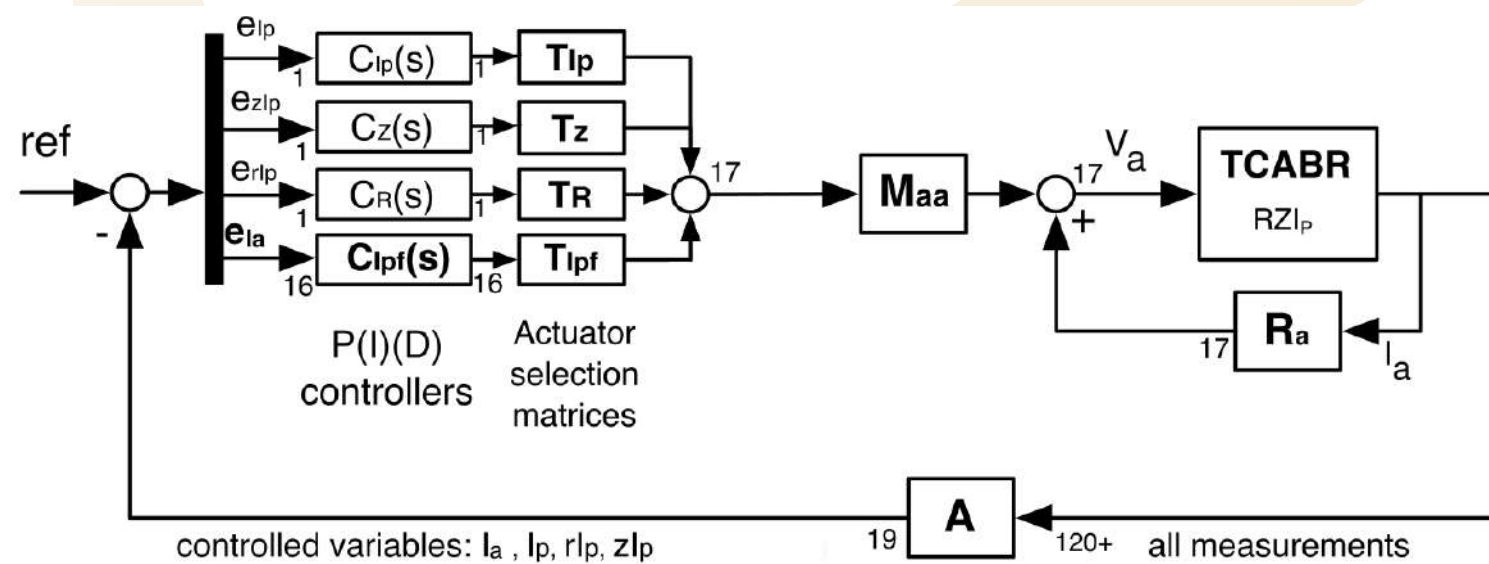
- *Configuração Snowflake*

- + 4 pontos de contato (ao invés de 2)
 - + Maior expansão de fluxo
 - + Acesso facilitado ao regime detachment

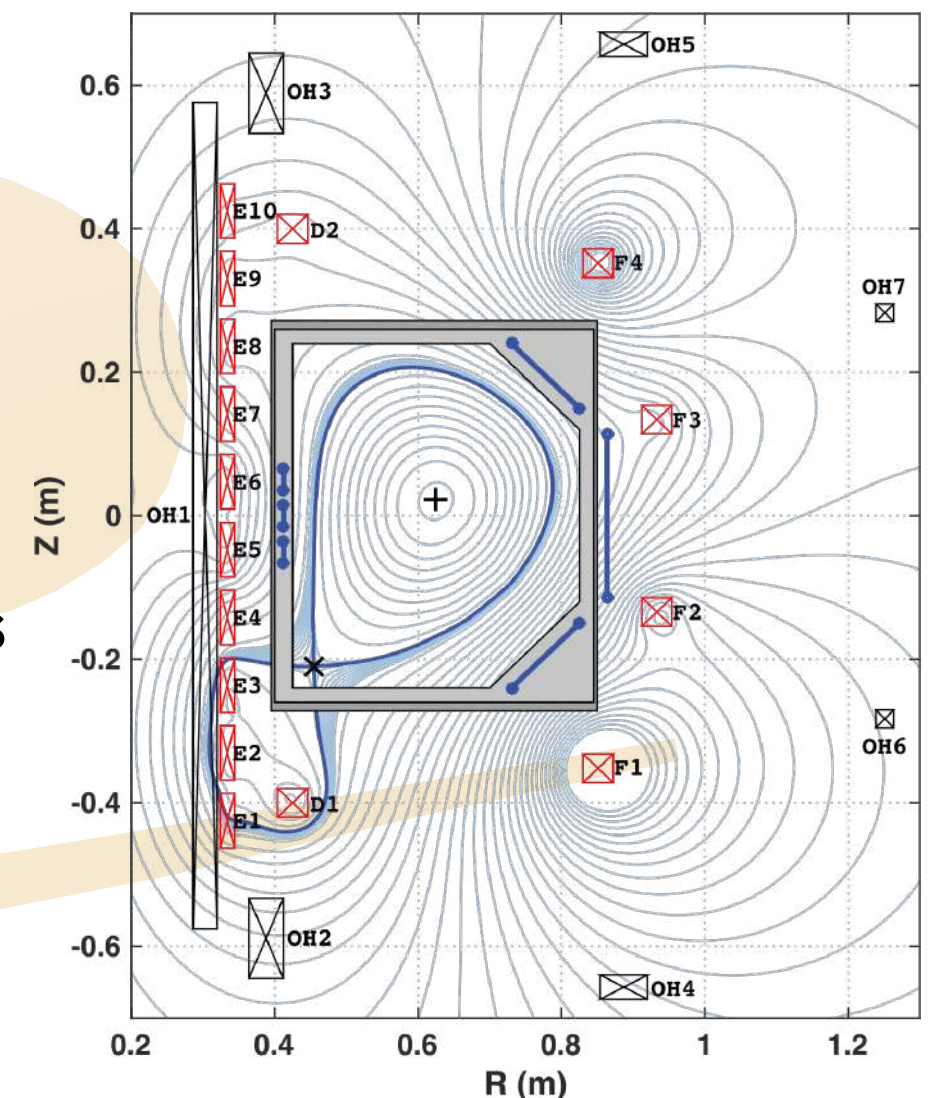


Um sistema de controle de plasma versátil é necessário para permitir a criação das várias configurações previstas para o TCABR

- Um sistema de controle de plasma versátil está sendo projetado para permitir a criação de uma variedade de cenários de plasma

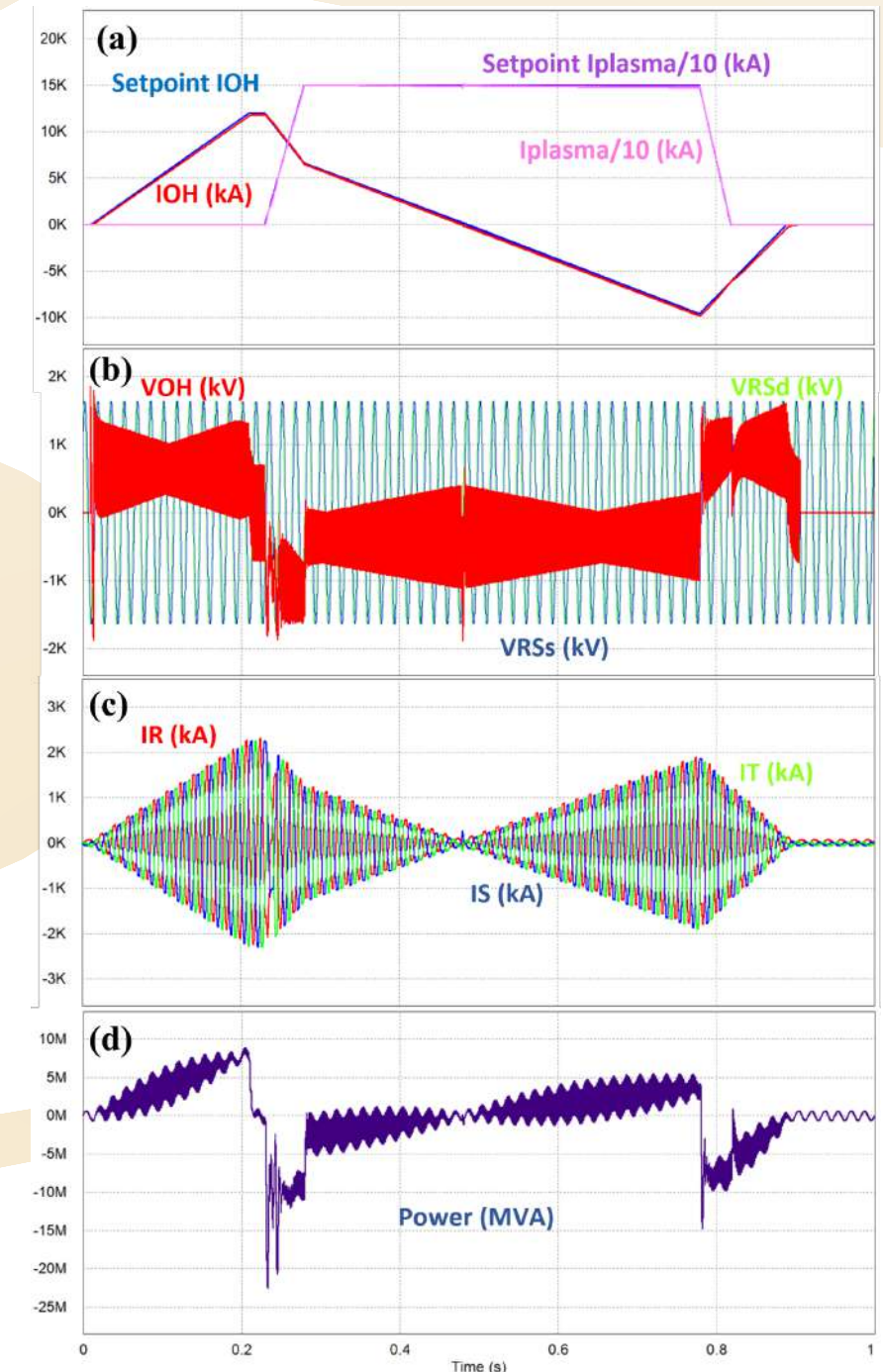
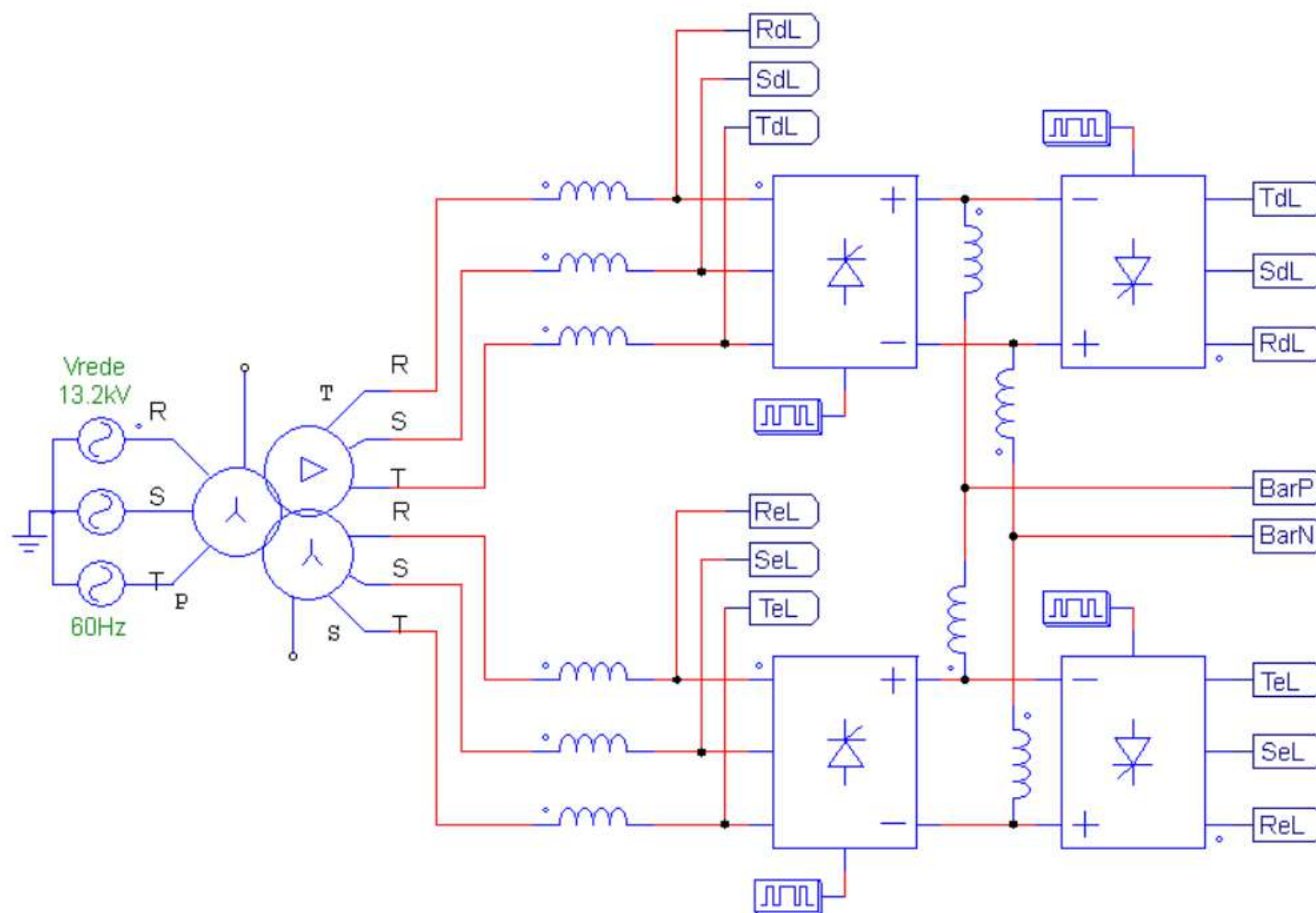


- 2 bobinas adicionais (D1 and D2) serão instaladas
 - Melhor flexibilidade em termos de controle da forma do plasma



Várias topologias eletrônicas de potência foram simuladas para identificar a melhor opção para controle de cenário de plasma

- A criação dos cenários de plasma previstos para o TCABR requer o desenvolvimento de 17 fontes de alta corrente
 - As fontes serão baseadas em conversores de 24 pulsos tiristorizados e deverão operar nos 4 quadrantes

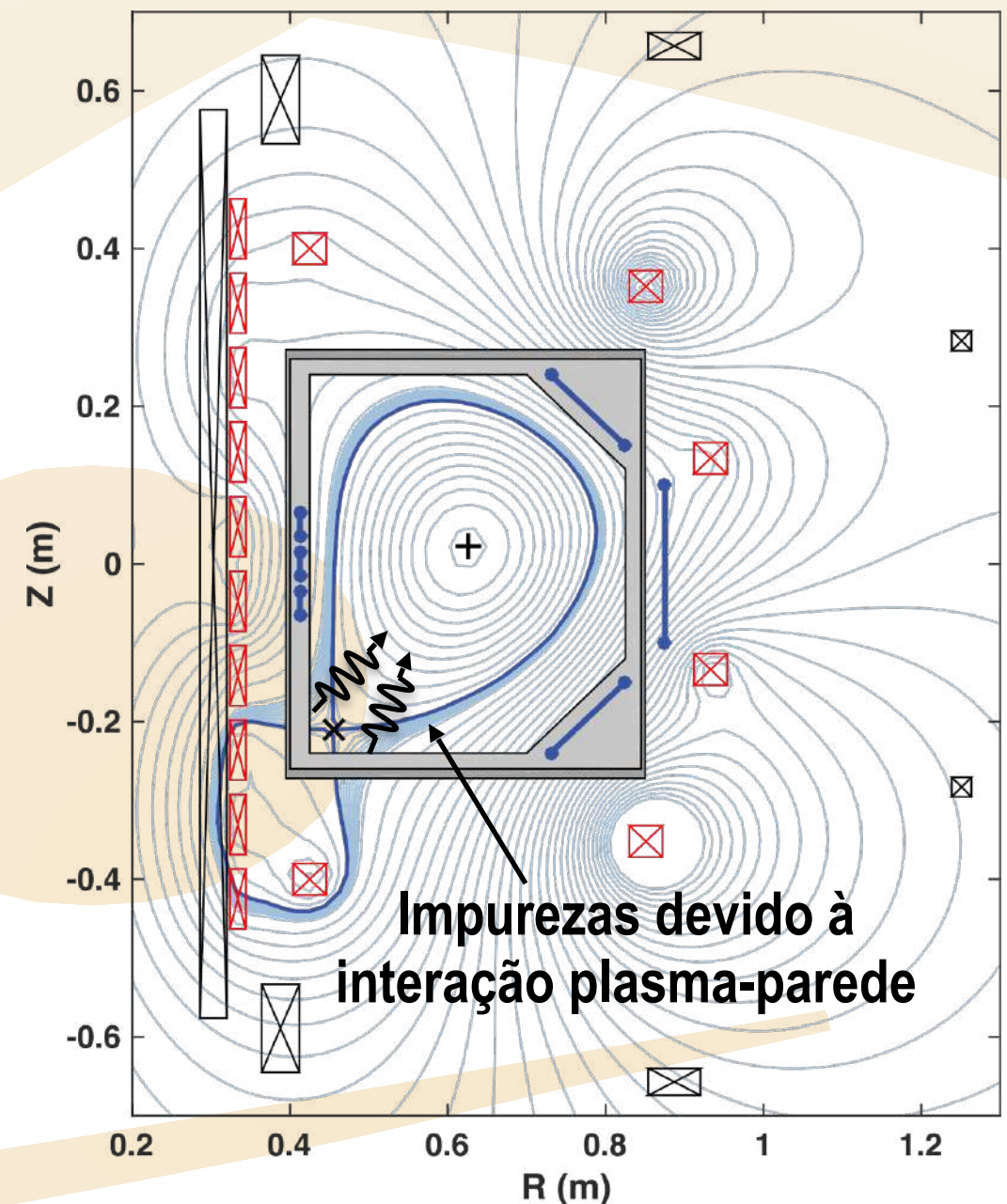


Modernização do tokamak TCABR para estudos de supressão de ELMs por campos RMP

- Os desafios científicos e tecnológicos associados ao disparo de ELMs
- **O modernização do TCABR**
 - O tokamak TCABR
 - Projeto e instalação de um conjunto inovador de bobinas RMP
 - Desenvolvimento de um sistema de controle de cenários de plasmas
 - Projeto e instalação de ladrilhos de grafite
 - Desenvolvimento de um sistema de injeção de helicidade
- **Resumo**

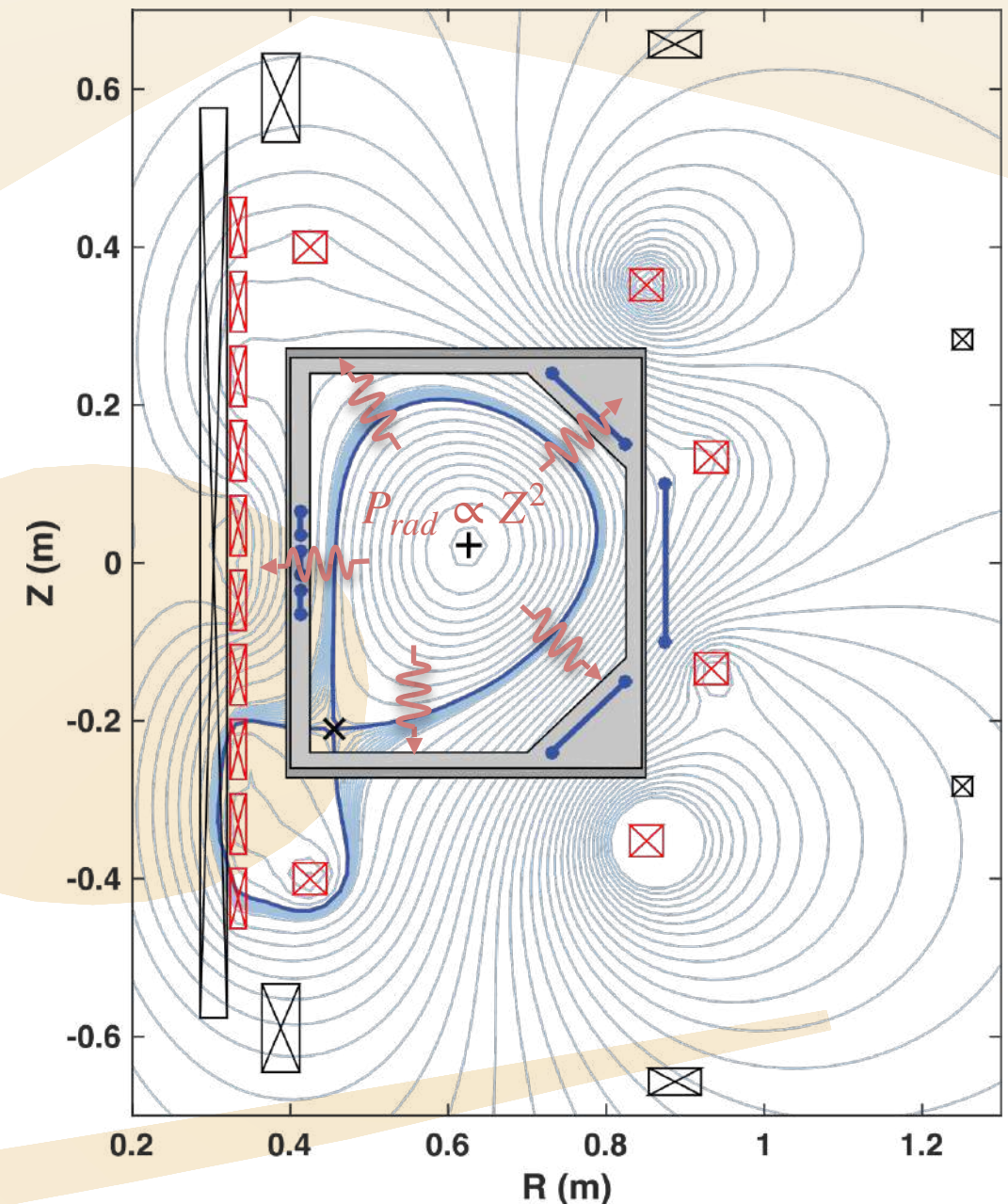
O material da primeira parede tem um impacto significativo no confinamento de energia do plasma

- A interação plasma-parede nos pontos de contato causa erosão na primeira parede
 - O material removido contamina o plasma



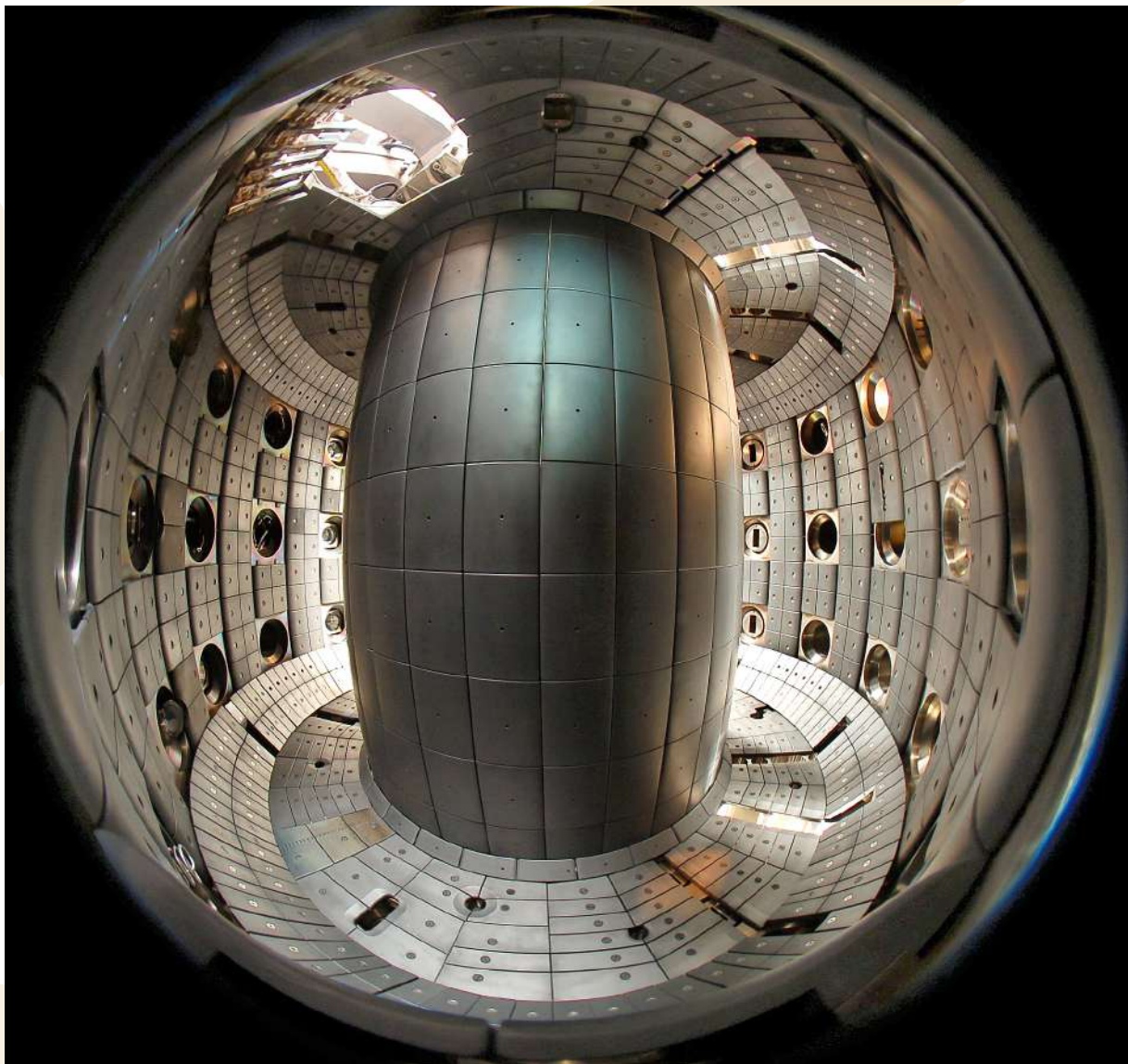
O material da primeira parede tem um impacto significativo no confinamento de energia do plasma

- A interação plasma-parede nos pontos de contato causa erosão na primeira parede
 - O material removido contamina o plasma
- A potência irradiada pelo plasma depende da concentração de impurezas e do seu número atômico ($\sim Z^2$)
 - Uma primeira parede de aço inoxidável ($Z = 26$) leva à uma maior perda de energia por radiação do que uma primeira parede de baixo Z
 - + Carbono ($Z = 6$) é o mais atrativo
 - + Crucial para operação em modo-H

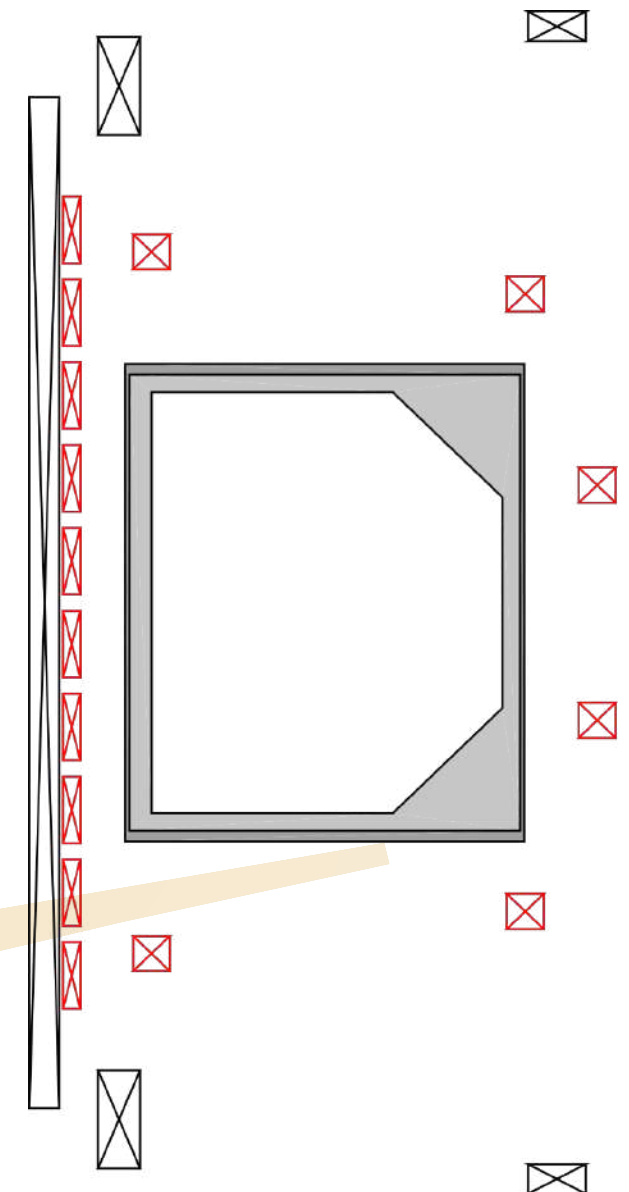


A instalação de ladrilhos de grafite reduzirá a concentração de impurezas de alto Z no plasma

- O projeto do formato dos ladrilhos de grafite levará em conta os diferentes perfis de deposição de calor nos diferentes cenários de plasma previstos para TCABR

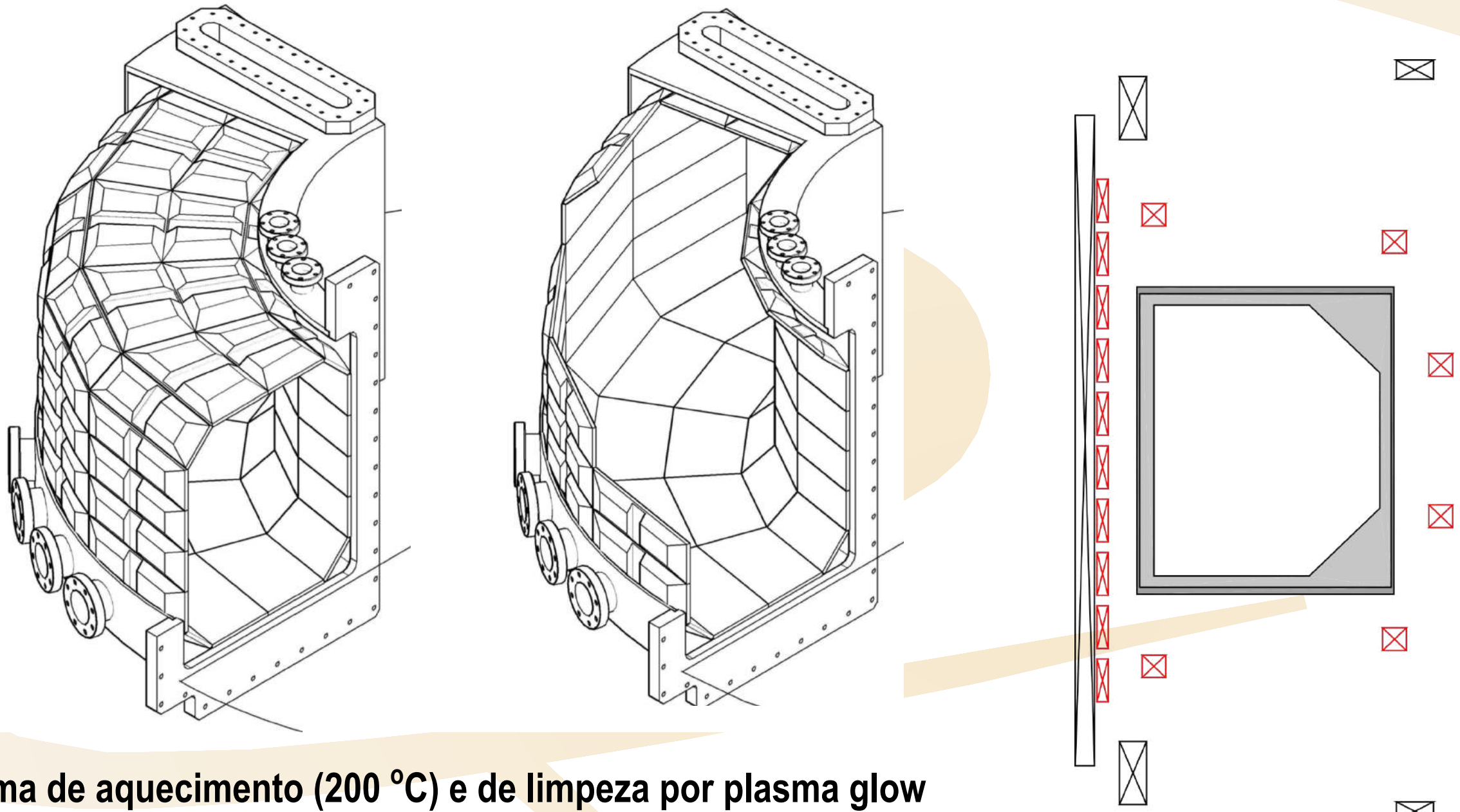


Example: ladrilhos de grafite do tokamak TCV



A instalação de ladrilhos de grafite reduzirá a concentração de impurezas de alto Z no plasma

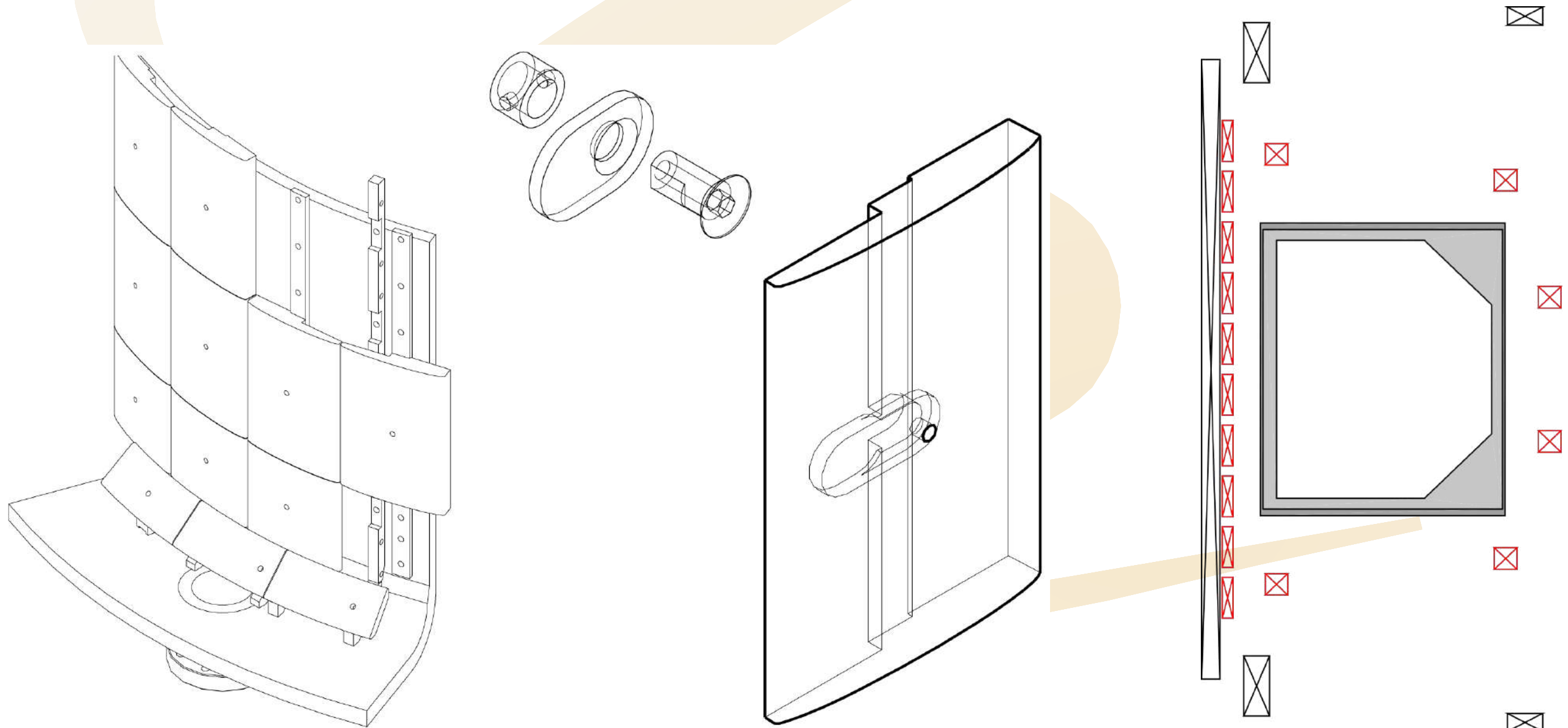
- O projeto do formato dos ladrilhos de grafite levará em conta os diferentes perfis de deposição de calor nos diferentes cenários de plasma previstos para TCABR



Um sistema de aquecimento (200 °C) e de limpeza por plasma glow permitirão um condicionamento dos componentes internos

A instalação de ladrilhos de grafite reduzirá a concentração de impurezas de alto Z no plasma

- O projeto do formato dos ladrilhos de grafite levará em conta os diferentes perfis de deposição de calor nos diferentes cenários de plasma previstos para TCABR
 - *Análise termo-mecânica feita com o código de elementos finitos ANSYS*

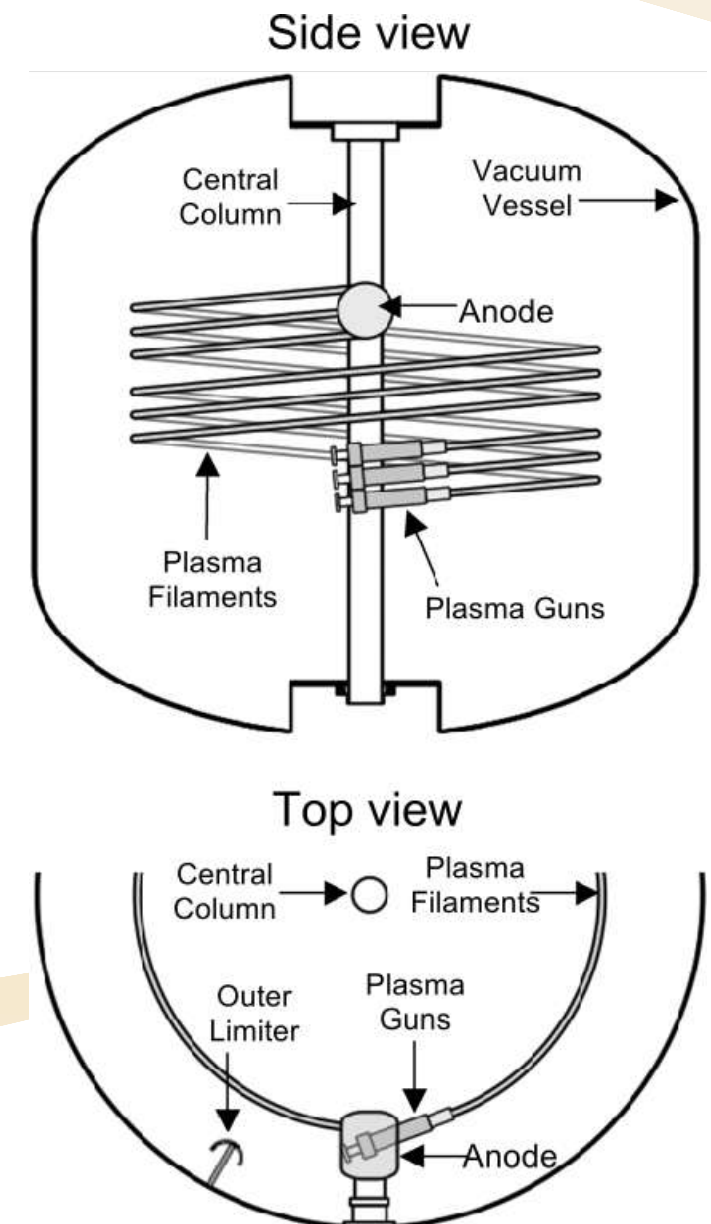
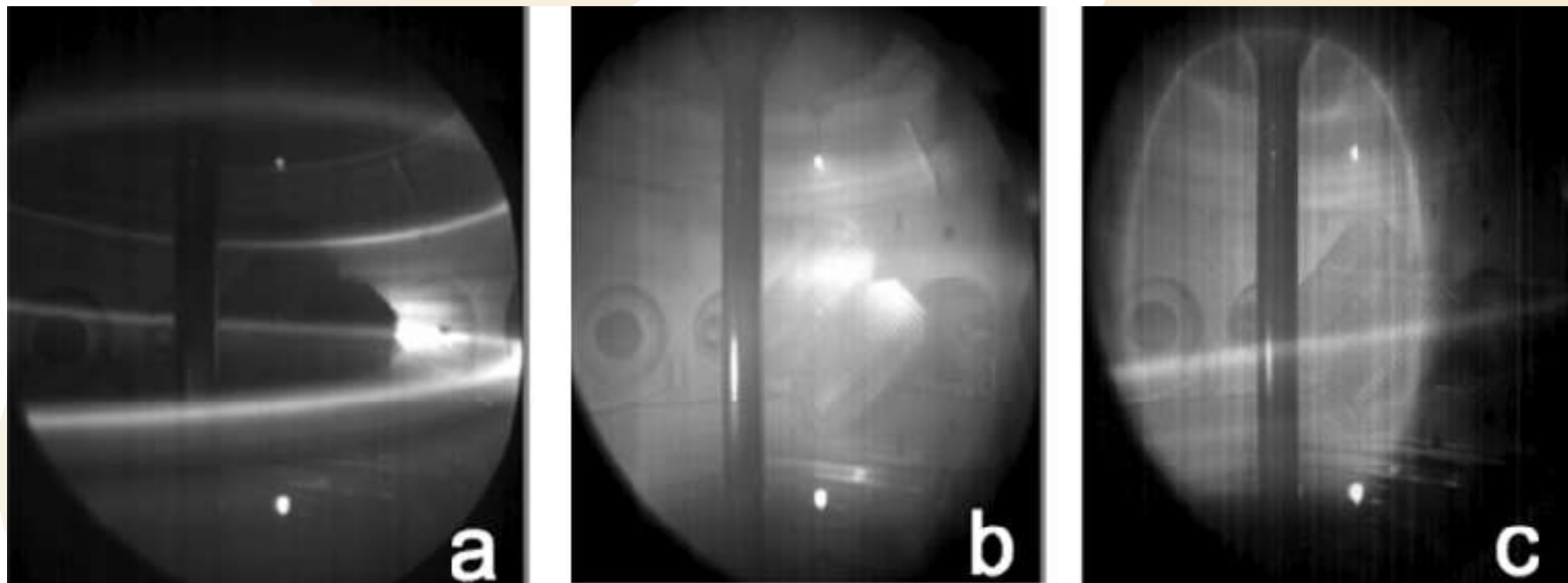


Modernização do tokamak TCABR para estudos de supressão de ELMs por campos RMP

- Os desafios científicos e tecnológicos associados ao disparo de ELMs
- **O modernização do TCABR**
 - O tokamak TCABR
 - Projeto e instalação de um conjunto inovador de bobinas RMP
 - Desenvolvimento de um sistema de controle de cenários de plasmas
 - Projeto e instalação de ladrilhos de grafite
 - Desenvolvimento de um sistema de injeção de helicidade
- **Resumo**

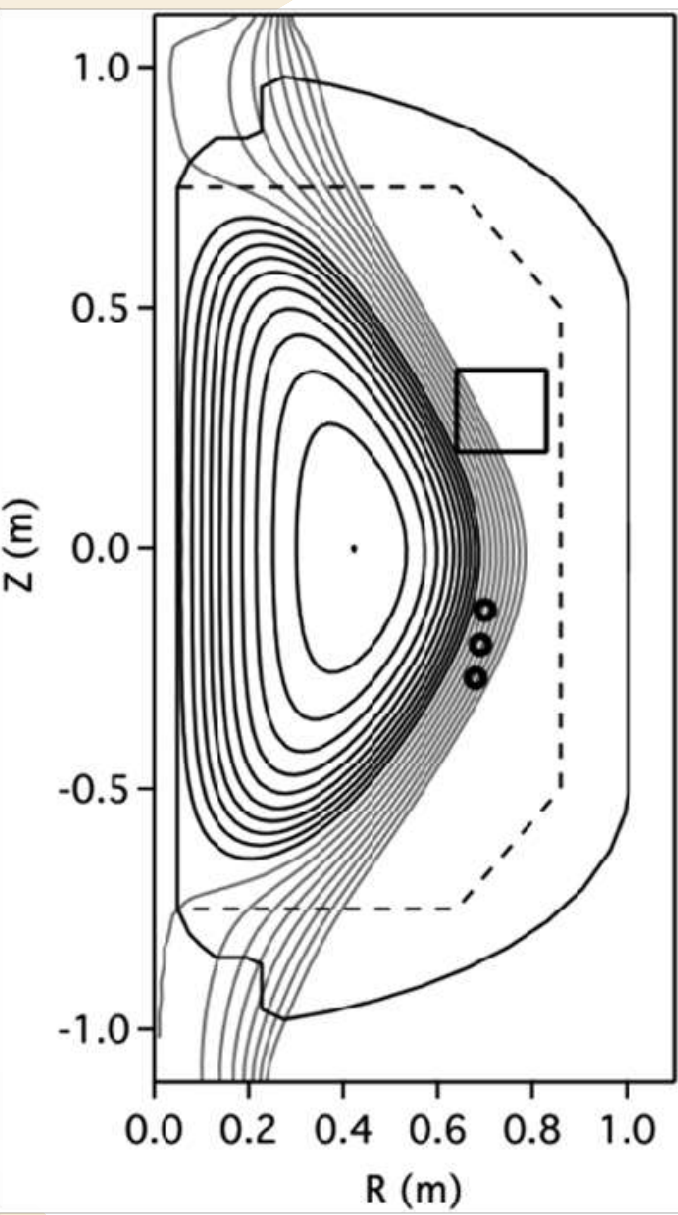
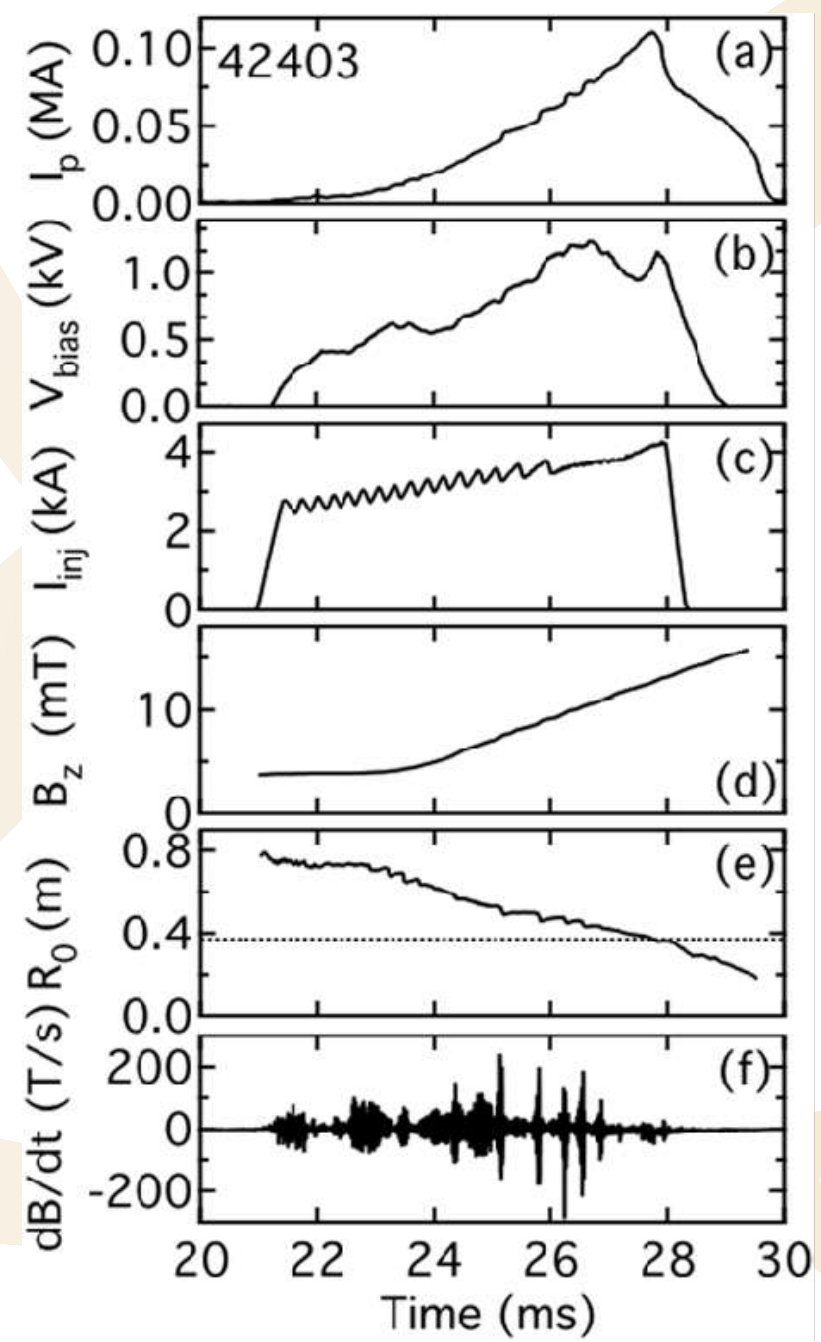
O desenvolvimento de uma injeção de helicidade para o TCABR permitirá descargas de maior duração

- Um injetor de helicidade cria corrente de plasma indutiva usando fontes DC
 - Reconexão magnética de filamentos de corrente causa anéis de corrente que sustentam a corrente toroidal do plasma
- No *Pegasus Toroidal Experiment*, os filamentos de corrente são criados por uma tochas de plasma



Sistemas de injeção de helicidade podem gerar plasmas com alta corrente toroidal sem a necessidade de um solenóide central

- O sistema do *Pegasus* é capaz de gerar correntes de plasma de 100 kA usando apenas 4 kA de corrente DC



I_p (MA)	0.11
$B_{\phi 0}$ (T)	0.15
R_0 (m)	0.37
a (m)	0.32
A	1.2
κ	1.9
ℓ_i	0.22
β_p	0.09
β_t	0.01
q_0	16
q_{99}	51

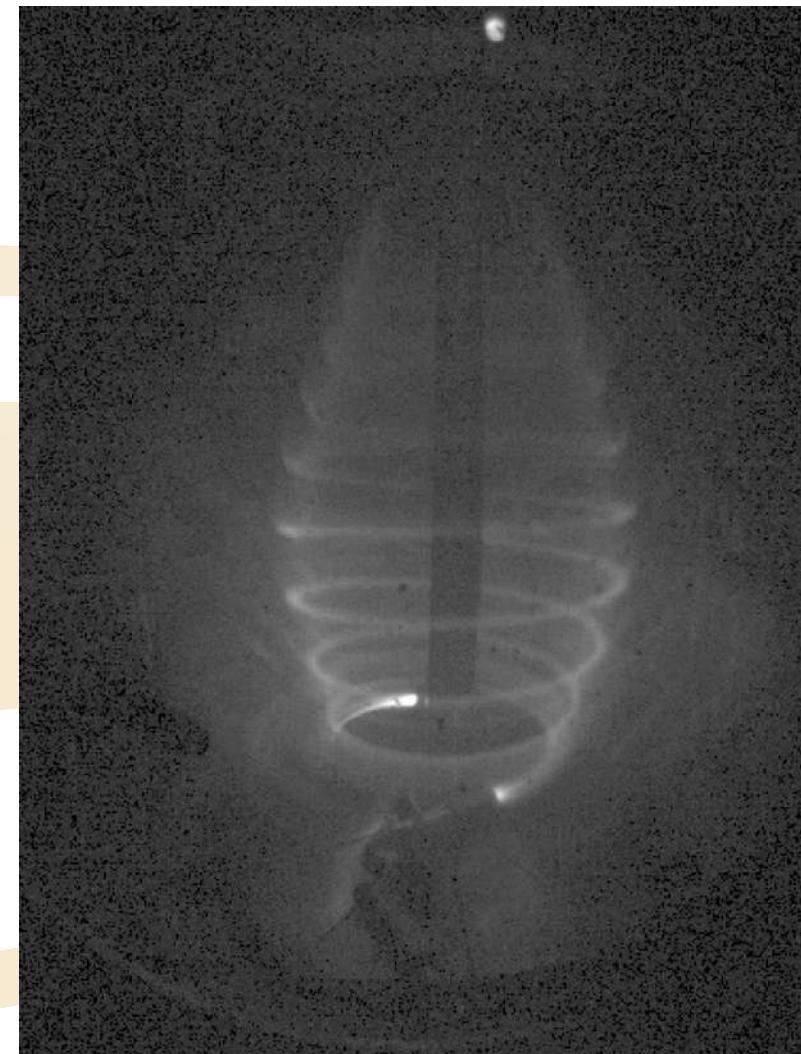
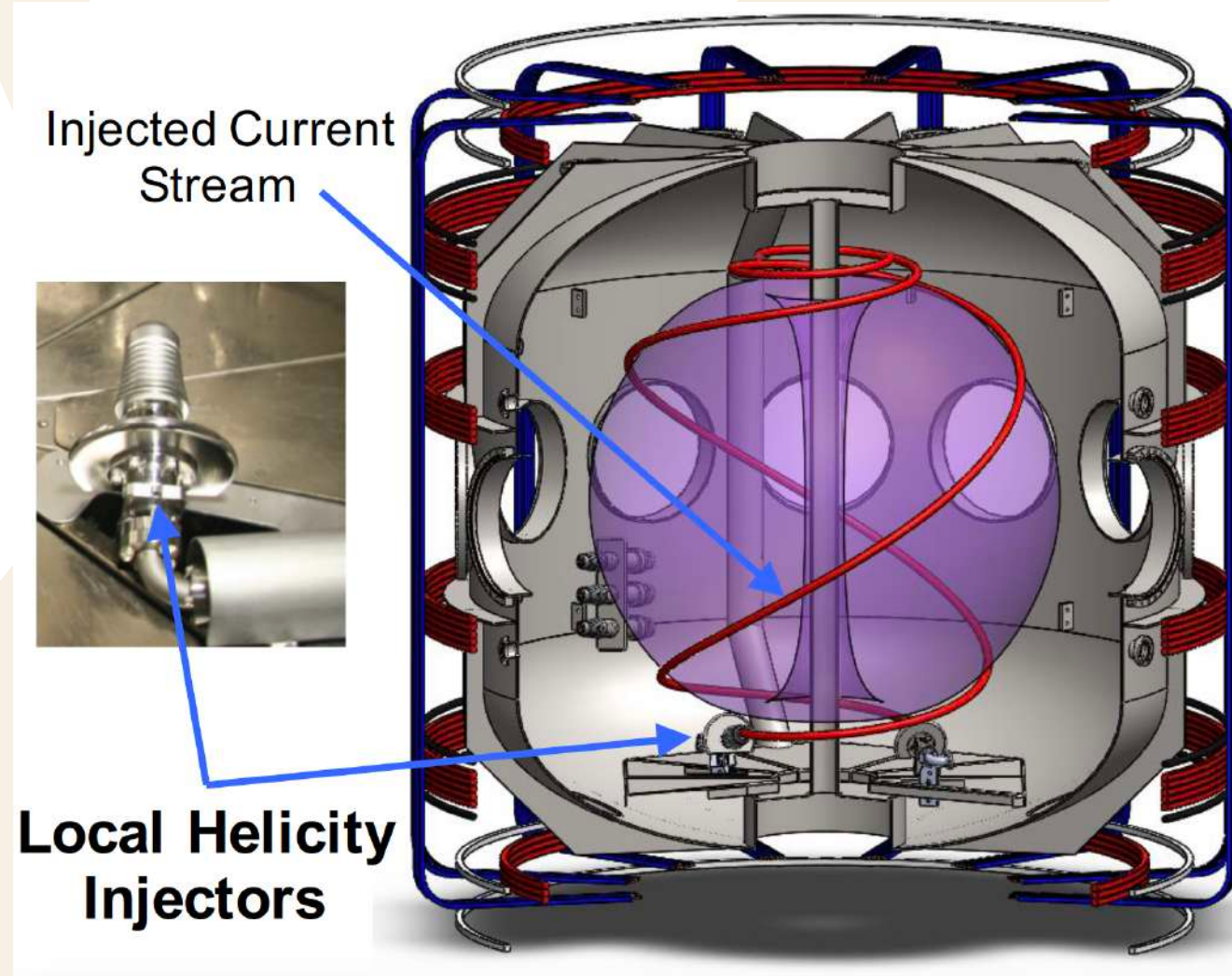
Na Universidade Federal do Espírito Santo, a pesquisa em fusão nuclear é realizada no Laboratório de Plasma Térmico

- O NOVA-UFES é um tokamak de pequeno porte que está sendo modernizado com um sistemas de injeção de helicidade utilizando tochas de plasma



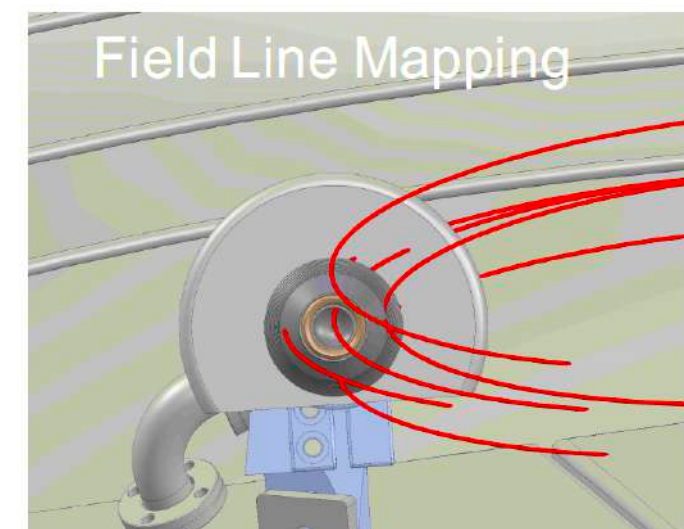
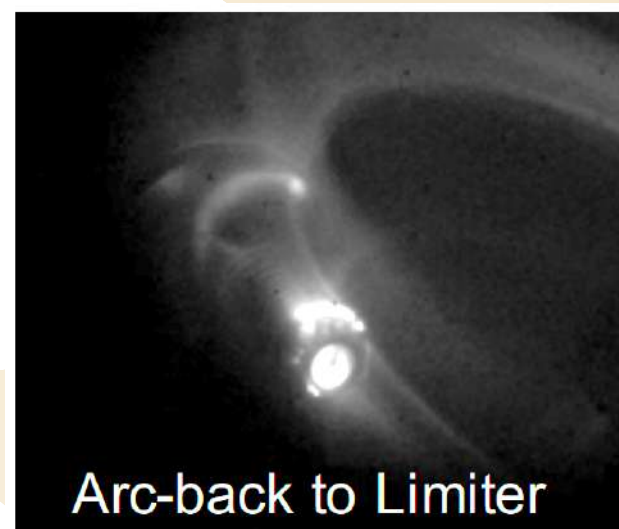
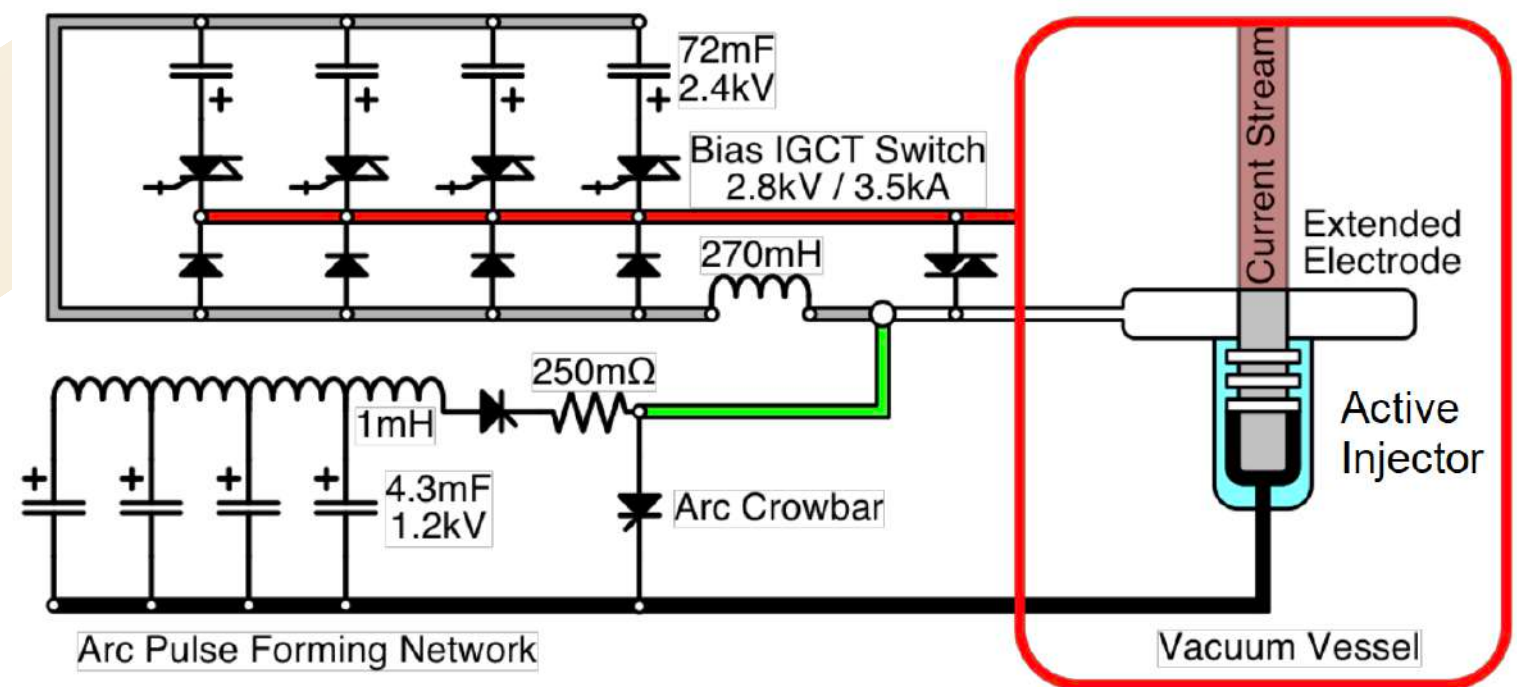
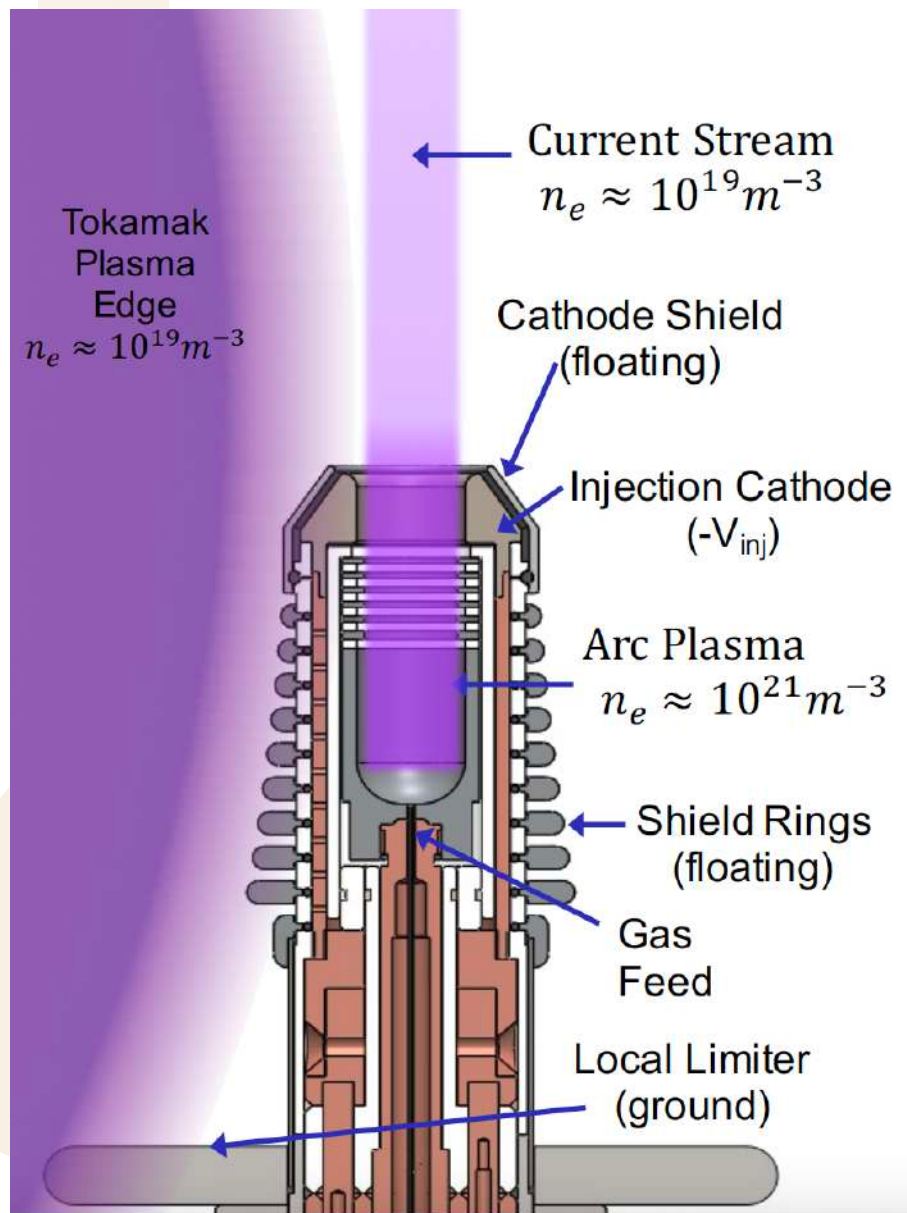
Na Universidade Federal do Espírito Santo, a pesquisa em fusão nuclear é realizada no Laboratório de Plasma Térmico

- O NOVA-UFES é um tokamak de pequeno porte que está sendo modernizado com um sistemas de injeção de helicidade utilizando tochas de plasma



Na Universidade Federal do Espírito Santo, a pesquisa em fusão nuclear é realizada no Laboratório de Plasma Térmico

- O NOVA-UFES é um tokamak de pequeno porte que está sendo modernizado com um sistemas de injeção de helicidade utilizando tochas de plasma



Modernização do tokamak TCABR para estudos de supressão de ELMs por campos RMP

- **Áreas abertas à colaboração relacionadas à modernização do TCABR**
 - Projeto e instalação de um conjunto inovador de bobinas RMP
 - + Cenários com campos RMP de geometria e espectro amplo, cálculo de divertor footprints, rotação de diferentes harmônicos com $n \leq 9$, fontes de potência, modelagem elétrica, térmica e mecânica
 - Desenvolvimento de um sistema de controle de cenários de plasmas
 - + Projeto de cenários de plasma, validação do modelo EM da máquina (planta de controle), sistema de controle de forma, implementação de controles avançados (H-infinito), fontes de potência, aquisição de dados, aprendizagem de máquina (IA)
 - Projeto e instalação de ladrilhos de grafite
 - + Modelagem térmica e mecânica, instalação de tile shunts
 - Desenvolvimento de um sistema de injeção de helicidade
 - + Fontes de potência, tochas de plasma, geometria do limitador
 - Desenvolvimento de diagnósticos de plasma
 - + Diagnósticos magnéticos, espalhamento Thomson, reflectometria, interferometria, polarimetria, ECE, sondas de Langmuir, sondas Ball Pen, espectroscopia, diagnósticos de imagem (visível e infravermelho), bolometria, tomografia de raio-X, detectores D_α