

Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP

**Departamento de Engenharia de
Estruturas e Fundações**

ISSN 0103-9822

BT/PEF/9516

**A Engenharia da Fusão
Termonuclear Controlada.
Sua História e seu Futuro**

**Ruy Marcelo de Oliveira Pauletti
Victor Manoel de Souza Lima**



Escola Politécnica - EPBC



31200053703

895729

São Paulo - 1995

Pauletti, Ruy Marcelo de Oliveira
A engenharia da fusão termonuclear controlada :
sua história e seu futuro / R.M.O. Pauletti, V.M.S.
Lima. -- São Paulo : EPUSP, 1995.
16p. -- (Boletim Técnico da Escola Politécnica
da USP, Departamento de Engenharia de Estruturas e
Fundações, BT/PEF/9516)

1. Fusão termonuclear I. Lima, Victor Manoel de
Souza II. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações III. Título IV. Série

CDU 621.039.6

A ENGENHARIA DA FUSÃO TERMONUCLEAR CONTROLADA. SUA HISTÓRIA E SEU FUTURO.

RUY MARCELO DE OLIVEIRA PAULETTI & VÍCTOR MANOEL DE SOUZA LIMA

Departamento de Estruturas e Fundações
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Caixa Postal 61548, CEP 05424-930, São Paulo
email: pauletti@if.usp.br

SUMÁRIO

O trabalho discute os problemas ligados ao desenvolvimento e à engenharia dos reatores baseados na fusão termonuclear controlada. Inicialmente, discute-se a questão da demanda energética das sociedades modernas, apresentando a fusão como uma possível fonte de energia de impacto ambiental moderado e segurança intrínseca, empregando combustíveis praticamente inexauríveis e facilmente acessíveis. Em seguida, delineiam-se os princípios básicos da fusão termonuclear controlada baseada no confinamento magnético de plasmas, com ênfase na configuração tokamak. Aspectos econômicos, ambientais e de segurança são brevemente discutidos. Finalmente, resenham-se os passos das pesquisas em fusão controlada até o presente (tanto no plano mundial como nacional) e discutem-se os prognósticos para o futuro desta tecnologia.

DEMANDA MUNDIAL E FONTES DE ENERGIA

Mais que requerimento para a prosperidade econômica das sociedades, a energia constitui uma questão crucial para a humanidade (McCrorry, 1989). Um estrangulamento no fornecimento de energia, ou o uso predatório dos recursos naturais do planeta, pode levar nossa civilização industrial a um colapso, do qual ela pode nunca mais se recuperar, em um mundo cujos recursos materiais e energéticos facilmente exploráveis estiverem quase esgotados (Cloud, 1981), (Kennedy, 1993).

Na escala de tempo da história da humanidade, o consumo mundial de energia foi sempre pequeno, se comparado com as últimas décadas. Por volta de 600 a.C., havia cerca de 10 milhões de pessoas na terra. Este número cresceu exponencialmente, chegando a 5 bilhões, hoje (Fig. 1). Esta população consome anualmente o equivalente a $8 \cdot 10^9$ toneladas de petróleo, de forma desigual: o consumo *per capita* americano, por exemplo, chega a 7 vezes a média mundial (McCrorry, 1989). Projeta-se a estabilização da população mundial em cerca de 12 bilhões de pessoas, por volta do ano 2075. Um limite inferior para essa estimativa são 10 bilhões.

Para estimar os requerimentos de energia no próximo século, é conveniente que se considerem múltiplos das necessidades individuais. Sabe-se que o adulto médio necessita de aproximadamente 2 Kcal de alimento por dia, ou 100 W de potência contínua, para manter-se vivo. Muito mais energia é necessária, porém, para manter ou melhorar o padrão de vida da população mundial (nos Estados Unidos, o consumo per capita atual é cerca de 100 vezes o de subsistência). Tomando por base um consumo per capita médio de 30 vezes o consumo de subsistência, requer-se uma economia global de 30 TW antes do ano 2100.

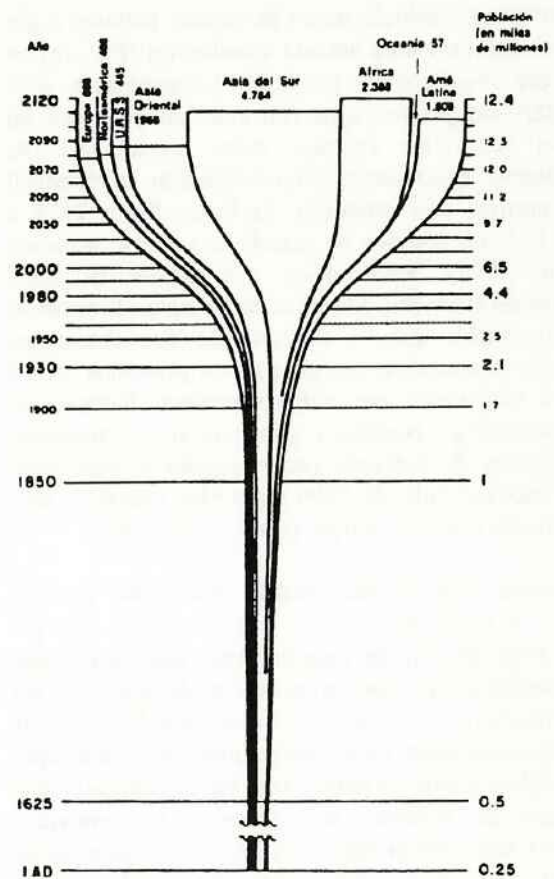


Fig. 1 População no passado e projeção de crescimento por regiões do mundo. Os números à direita indicam a população total no passado e aquela projetada. As linhas horizontais e os números acima delas indicam o ano em que a população de cada região deve estacionar. Extraído de (Cloud, 1981).

Está implícita nessa estimativa a esperança de que tanto as nações desenvolvidas como as subdesenvolvidas aproximem-se da paridade no uso da energia. Os países industriais maduros devem começar a reduzir a intensidade da demanda de suas economias.

mediante maior eficiência no consumo e conservação da energia e mudanças nos processos de produção de bens e serviços. Nos EUA, prevê-se que o consumo *per capita* mostre, por volta do ano 2000, uma redução de 33% em relação à década de 60.

Como pode o mundo atender às necessidades de uma economia de 30 TW (ou 3000 W *per capita*)?

Os combustíveis fósseis devem permanecer como a principal fonte de energia no início do próximo século (Dolan, 1982), mas é provável que não mais consigam prover a maior parte da energia necessária para o século XXI – principalmente se o dano ambiental causado por fatores como a concentração de dióxido de carbono na atmosfera limitar o seu uso.

As curvas da produção anual de carvão, petróleo e gás natural mostram uma notável semelhança (Fig. 2a). A produção anual começa crescendo linearmente e, após uma fase de poucos anos (no caso do petróleo) ou séculos (caso do carvão), entra numa fase de crescimento exponencial. O crescimento exponencial deve saturar, e a produção, declinar. Entre 2025 e 2050, 80% do petróleo do mundo terá sido consumido (Dolan, 1982). Baseando-se nas estatísticas mais recentes do Conselho Mundial de Energia, Tomabechi (1994) conclui que “a extrapolação das tendências atuais de consumo de energia para os próximos 15–20 anos é alarmante, prevendo-se drástica redução no fornecimento de petróleo e gás natural”. A melhoria das técnicas de extração pode estender o ciclo algo além, mas por volta de 2100 o petróleo não mais será uma grande fonte de energia primária (Fig. 2b).

Estimativas semelhantes podem ser feitas para o carvão. A produção deve ter um pico entre 2100 e 2200; 80% do carvão mundial terá sido consumido num período de duzentos anos a partir do ano 2000. Há dificuldades para a mineração e a queima do carvão de uma forma aceitável para o meio ambiente. A produção de energia a partir do carvão tem baixa eficiência, e o manuseio do minério, das cinzas e das emissões gasosas é um sério problema. A Academia Nacional de Ciência americana concluiu em um estudo recente (McCrorry, 1989) que “os danos potenciais associados às mudanças climáticas provocadas pelo CO₂ são graves o suficiente para que se renuncie às opções energéticas baseadas em combustíveis fósseis”. Segundo McCrorry, (1989), “estima-se que a temperatura média da Terra possa subir entre 1,5 °C a 4,5 °C até a metade do próximo século se a produção dos gases que provocam o efeito estufa continuar a crescer à presente taxa. Isto faria a atmosfera mais quente do que em qualquer período dos últimos 100 mil anos”.

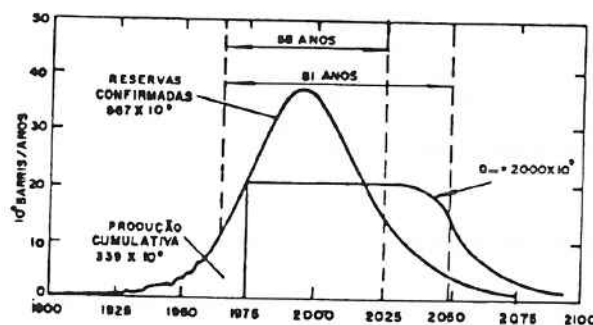
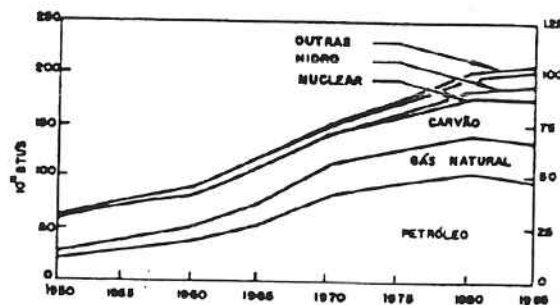


Fig. 2 Demanda mundial registrada para as fontes de energia primária (a) e projeções para o consumo de petróleo (b), conforme McCrorry (1989).

A energia nuclear deve sustentar cerca da metade do crescimento da demanda de energia elétrica até o ano 2000 e ser a fonte mais barata de eletricidade para o próximo século, sem que as reservas de urânio ou a capacidade mundial para o seu enriquecimento ponham qualquer restrição ao crescimento dessa forma de energia. Existem presentemente cerca de quatrocentas usinas nucleares em todo o mundo. A França atende a 71% de sua demanda energética usando os 37,5 GW de capacidade nuclear nela instalados.

Ainda segundo McCrorry, estimativas do Departamento de Energia do governo americano mostram que haverá um excesso de 100 GW na demanda americana, em relação ao suprimento disponível, por volta do ano 2000, e este gap crescerá para 200 GW ou mais até 2005. Novas usinas nucleares, se iniciadas hoje, não estarão concluídas antes do ano 2000, considerando-se o tempo médio de duração dos projetos. Isto explica, em parte, a grande preocupação americana com a situação mundial do petróleo.

Existem três alternativas principais para atender à demanda de uma economia mundial de 30 TW, em conformidade com as recomendações de se evitar a exploração dos combustíveis fósseis: a energia solar, a fissão com reatores rápidos e a fusão.

A energia solar, se captada com eficiência de 20% numa área de 0,2% da superfície da Terra (grosso modo a fração coberta por desertos), poderia prover energia equivalente a 76 bilhões de barris de petróleo

por ano, algo menos que 10 TW de potência contínua. Desenvolvida até este estágio, a energia solar poderia suprir um terço das necessidades de uma economia de 30 TW. A fissão, com os reatores regenerativos, tem um potencial de aproximadamente 85 vezes o potencial do inventário inicial de petróleo na Terra. A fusão tem um potencial energético 10 milhões de vezes maior que o da fissão, podendo

constituir, a longo prazo, uma fonte de energia de impacto bastante moderado sobre o meio ambiente, de segurança intrínseca, empregando combustíveis praticamente inexauríveis e facilmente acessíveis.

FISSÃO E FUSÃO

Há dois tipos de processos nucleares que podem levar a reações exotérmicas autosustentáveis em escala macroscópica. Um destes processos é a fissão, quando um núcleo muito pesado é dividido por um neutrão em fragmentos velozes, radioativos, e emitindo ainda outros neutrões. O segundo processo é a fusão, quando dois núcleos leves combinam-se para formar um núcleo veloz, mais pesado. Fissão e fusão liberam, sob forma de energia cinética das partículas finais, milhões de vezes mais energia por reação que os processos químicos.

O papel da fusão na natureza dificilmente pode ser exagerado: é a fusão a fonte da energia do sol e das outras estrelas. é, portanto, a fonte primária de todas as formas de energia fósseis e renováveis disponíveis em nosso planeta. Além disso, sendo a fusão o processo que gerou os elementos químicos pesados, a partir dos elementos leves originais, ela pode ser considerada como um ancestral remoto da fissão. Ao contrário, o papel da energia de fissão na natureza é negligenciável.

Aqui na Terra, porém, é muito mais difícil criar as condições para as reações de fusão que de fissão. Enquanto os reatores comerciais a fissão já se encontram em funcionamento há décadas, os atuais experimentos com a fusão ainda despendem potências substancialmente maiores que aquelas liberadas nas reações. Os primeiros sistemas de produção de energia por fusão, conforme concebidos atualmente, devem liberar potências de pelo menos 1 GW, de modo que, ao contrário do que ocorreu com a fissão, seu desenvolvimento requer enormes instalações experimentais. Sistemas de fusão mais compactos poderão talvez ser desenvolvidos num futuro mais remoto.

FUSÃO TERMONUCLEAR

Devido ao fato de os núcleos atômicos terem carga positiva e assim repelirem-se mutuamente, eles estão em geral demasiadamente afastados para que ocorra um número significativo de reações de fusão. Porém, se

a matéria for elevada a altas temperaturas, seus átomos e moléculas acabam dissociados em elétrons e núcleos (diz-se então que a matéria está em estado de *plasma*). Quanto maior a temperatura do plasma, tanto mais altas serão as velocidades relativas entre os núcleos, até que estas sejam suficientes para vencer as forças internucleares de repulsão (Fig. 3), quando finalmente ocorrem as reações de fusão termonuclear.

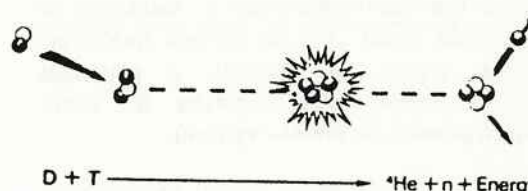


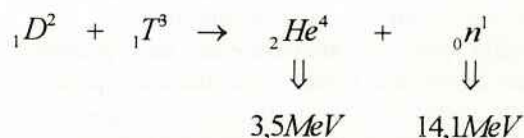
Fig. 3 Fusão termonuclear. Quando dois núcleos colidem com velocidade suficiente, podem aproximar-se até vencer o potencial de repulsão eletrostática, e a reação de fusão ocorre.

A temperatura necessária para manter as reações termonucleares no centro de estrelas como o sol é de cerca de 10 milhões de graus Celsius. Na Terra, a produção de quantidades líquidas de energia por meio de reações de fusão vai requerer temperaturas cerca de dez vezes mais altas que a do núcleo do sol. Estas temperaturas são difíceis de alcançar e mais difíceis ainda de sustentar.

O REATOR A FUSÃO D-T

O combustível de maior interesse para a fusão é uma mistura em iguais proporções de deutério e trítio (dois dos três isótopos do hidrogênio), uma vez que esta mistura exige, para se obter ganho de energia, a menor temperatura T e o menor produto $n\tau$ possíveis (n é o número de núcleos por metro cúbico de combustível e τ o tempo de confinamento da energia do plasma). A temperatura requerida para uma reação D-T auto-sustentada é cerca de 10 keV (ou cerca de 100 milhões de graus Celsius). O valor $n\tau$ é cerca de $3 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}\text{s}$. Enquanto o deutério é abundante em nosso planeta, o trítio, sendo instável, com uma meia vida de aproximadamente 12 anos, deve ser produzido.

A reação entre o deutério e o trítio produz um núcleo de hélio ("partícula alfa") e um neutrão, de acordo com a expressão



onde as energias indicadas referem-se à energia cinética dos produtos da reação, associada a um déficit,

no balanço de massa da reação, de 0,01875 vezes a massa de um próton.

Enquanto o nêutron deixa imediatamente o plasma, a partícula alfa pode ser aproveitada para aquecê-lo. A reação de fusão D-T será auto-sustentável, isto é, o plasma atingirá a ignição, quando a energia transportada pelas partículas alfa (20% da energia liberada) permanecer no plasma por um tempo suficiente para que sua temperatura se mantenha no patamar requerido. Estes 20% de energia finalmente atingirão, sob forma de radiação e partículas energéticas, os componentes materiais do reator voltados para o plasma, ou *primeira parede*.

Os nêutrons transportam 80% da energia liberada para além da primeira parede, até o *manto* que a envolve. Refrigerantes circulando dentro do manto e dos componentes da primeira parede transferem o calor gerado para fora da área do reator, onde vão produzir vapor e gerar eletricidade, à maneira do que é feito nos reatores a fissão (Fig. 4).

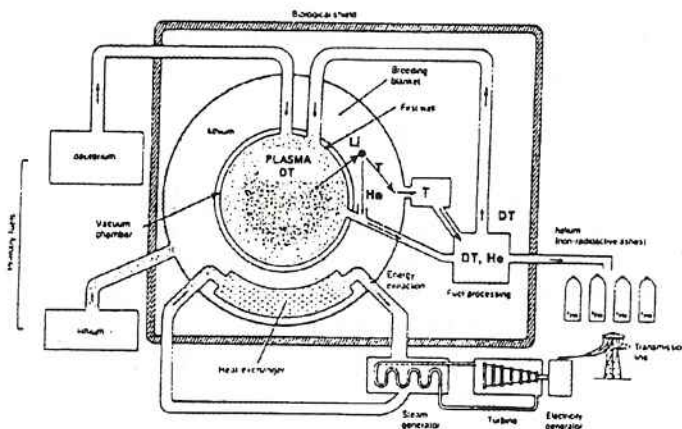


Fig. 4 Esquema de funcionamento de um reator a fusão (IFRC/IAEA Status Report, 1990).

O manto serve ainda para outro propósito essencial, qual seja, produzir o trítio necessário para “alimentar” (*breeding*) o reator a fusão, a partir do instante em que a quantidade inicial de trítio (produzida externamente) tiver sido consumida. Esta função é desempenhada pelo lítio contido no manto, que pode ser dividido em trítio e hélio pelo bombardeamento dos nêutrons provenientes do plasma. O lítio é um elemento químico abundante na Terra. Os combustíveis primários de um reator a fusão D-T são, portanto, deutério e lítio.

FUSÃO POR CONFINAMENTO MAGNÉTICO

Há duas abordagens basicamente diferentes para a fusão termonuclear: a *fusão por confinamento magnético* e a *fusão por confinamento inercial*. A fusão por confinamento magnético em configurações toroidais é a linha de pesquisa que apresenta maiores possibilidades de ser empregada nos reatores a fusão do futuro próximo. É a única considerada neste trabalho.

O confinamento magnético baseia-se no fato de os campos magnéticos poderem limitar o transporte das partículas carregadas de um plasma (prótons e elétrons) na direção perpendicular às linhas de força. Ainda por meio da ação dos campos magnéticos, correntes elétricas macroscópicas podem ser mantidas no interior do plasma. Nos sistemas de confinamento toroidal, o plasma é livre para fluir em superfícies toroidais fechadas, coaxiais, mas impedido de fluir através delas. Tanto o vetor campo magnético como o vetor densidade de corrente do plasma são paralelos a estas superfícies, onde a pressão do plasma é constante. Além de uma determinada temperatura para entrar em ignição, o plasma deve ter uma pressão suficientemente alta, mas ainda assim muito mais baixa que a pressão do campo magnético, cuja intensidade, na região da estrutura de suporte dos condutores não pode exceder 16T, sob pena dos materiais supercondutores perderem esta propriedade. Resultam densidades de plasma 10^{-7} vezes menores que a densidade dos sólidos. O tempo de confinamento τ deve ser grande, tipicamente alguns segundos, para obter-se a ignição (na escala de tempo do movimento das partículas ao longo dos campos magnéticos de confinamento, 1 segundo é um tempo muito longo!). Para que τ seja suficientemente grande, toróides de plasma de grande volume são necessários para um reator – cerca de 1000 m^3 .

TOKAMAKS

A palavra “tokamak” é um acrônimo da expressão russa *toroidalnaya kamera magnitnaya*, ou “câmara magnética toroidal”. Este tipo de configuração foi inventado na União Soviética, no final dos anos 50. No início dos anos 70, os tokamaks haviam se tornado a principal linha de pesquisas no campo da fusão por confinamento magnético. Em um tokamak (Fig. 5) o gás de hidrogênio (ou seus isótopos) é injetado no interior de uma câmara toroidal, onde preliminarmente se obteve um alto vácuo. O campo magnético toroidal, gerado por correntes elétricas circulando em um grupo de bobinas (BCT), localizadas em torno da câmara de vácuo (CV), é então estabelecido. Uma variação de corrente fluindo nas bobinas de campo poloidal (BCP) provoca uma variação no fluxo magnético concatenado com a região da CV, induzindo assim um campo

elétrico toroidal, que ioniza o gás dentro da CV – o gás passa para o estado de plasma – e provoca o surgimento de uma corrente elétrica no plasma, I_p . Os campos magnéticos associados a I_p , junto com os campos produzidos pelas diversas bobinas, mantêm confinado o plasma produzido. As BCP externas controlam a posição e a forma da seção transversal do plasma (a configuração de plasma considerada ótima é a seção em D). Para garantir a estabilidade MHD do plasma, o campo magnético toroidal de um tokamak é a componente mais intensa do campo eletromagnético.

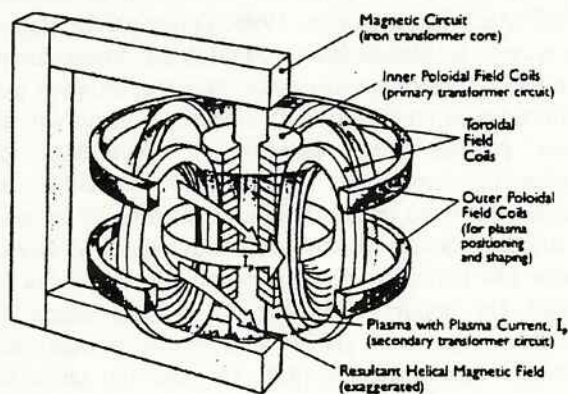


Fig. 5 Esquema de funcionamento de um tokamak, conforme (JJU, 1985).

A corrente do plasma pode também ser produzida e mantida em condições estáveis através da injeção, no plasma, de ondas eletromagnéticas ou feixes de neutrons (geração não-indutiva de corrente).

Além de proporcionar parte da configuração dos campos magnéticos de confinamento, a corrente gerada no plasma serve também para aquecê-lo e, embora a carga térmica na primeira parede da máquina seja limitada pelos campos magnéticos de confinamento, placas limitadoras especiais devem ser usadas para proporcionar um contato adequado entre plasma e parede.

A borda do plasma pode ser definida por “limitadores” materiais ou, numa configuração com “divertores”, pela “separatriz magnética” – o contorno entre as superfícies magnéticas fechadas e as abertas. As linhas do campo magnético na região entre a separatriz e a parede podem então ser defletidas do vaso principal para uma câmara “divertora” onde incidem sobre placas que recolhem as partículas e o calor por elas transportado. Os principais componentes de um tokamak podem ser vistos na Fig. 6, que mostra uma

vista em corte do JET, o maior tokamak em operação no mundo.

A magnitude dos campos magnéticos e das correntes elétricas requeridas pelo sistema eletromagnético leva ao surgimento de forças muito grandes atuando nos componentes das máquinas de fusão por confinamento magnético, que devem ser projetadas adequadamente.

16

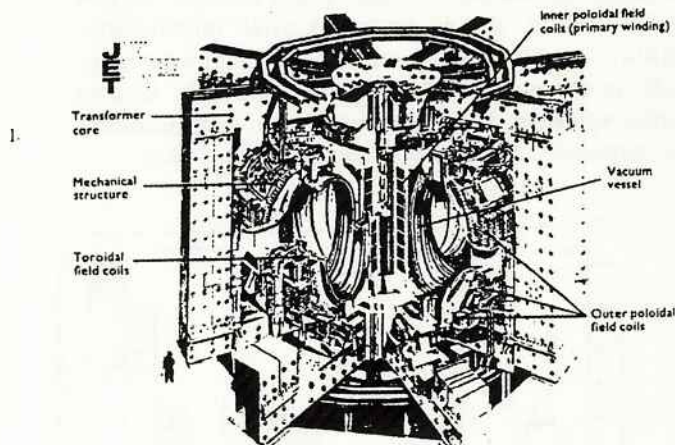


Fig. 6 Vista artística do JET (JJU, 1985).

ASPECTOS AMBIENTAIS, DE SEGURANÇA E ECONÔMICOS DA FUSÃO

Entre as principais motivações para se desenvolver a energia da fusão estão suas vantagens potenciais em termos ambientais, de segurança e de armazenamento de rejeitos. Combinados com um fornecimento praticamente ilimitado de combustível, estes aspectos parecem

suficientes para tornar a fusão competitiva com as principais fontes de energia, a longo prazo (FPAC/DEA, 1990). Os combustíveis primários para os reatores D-T (o deutério e o lítio) são abundantes na natureza e, em termos práticos, a fusão D-T é uma fonte inesgotável de energia, capaz de suprir a totalidade da demanda global (IFRC/IAEA Status Report, 1990). De fato, o deutério é abundante na água e o lítio está distribuído amplamente pela crosta terrestre e pelos oceanos, com depósitos com alta concentração em todo o mundo. A fusão vai consumir quantidades muito pequenas destes combustíveis, de 0,5 a 5,0 toneladas por GW-ano, dependendo da eficiência no uso do lítio natural (os recursos estimados de lítio disponível na Terra podem manter os reatores D-T por muitas centenas de anos). A perturbação ambiental provocada pela extração do lítio dos mares e do deutério da água em geral é pequena. A provisão dos outros materiais específicos para os reatores a fusão parece não impor

dificuldades especiais nem impacto ambiental relevante.

Os combustíveis primários e o produto direto da fusão – o gás inerte hélio – não são nem tóxicos nem radioativos; não provocam poluição atmosférica nem contribuem para acentuar o efeito estufa. Os reatores a fusão não conterão urânio, plutônio ou seus produtos de fissão. Acidentes de criticalidade são impossíveis. Não obstante, os reatores a fusão implicarão em alguma radioatividade, devida ao combustível intermediário (trítio) e irradiação dos materiais da estrutura do reator pelos neutrons produzidos nas reações de fusão. O trítio emite neutrons de baixa energia e é biologicamente ativo quando absorvido pelo corpo (Cohen, 1983).

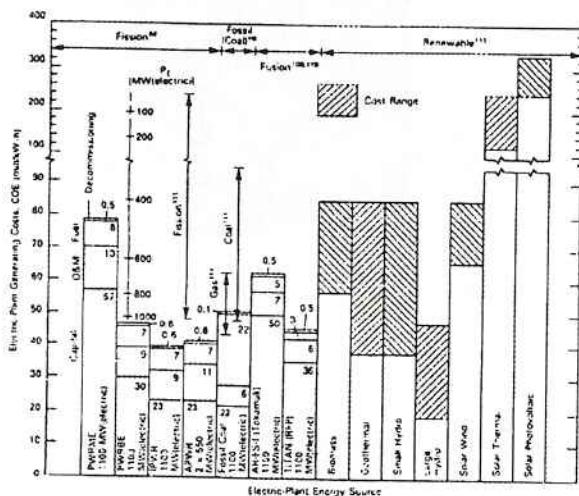


Fig. 7 Comparação dos custos estimados da energia (US\$ de 1988), para a fissão, a fusão, o carvão e várias fontes renováveis de energia (KRAKOWSKY, 1991).

Por outro lado, cerca de 80% da energia de um reator D-T será na forma de neutrons com 14,1MeV. Além dos problemas estruturais provocados por estes neutrons de alta energia, a ativação dos materiais estruturais, dos fluidos de processos e da atmosfera da sala do reator são problemas do ponto de vista da segurança. O nível de ativação dos materiais estruturais tem forte dependência (ordens de grandeza) de seu tipo. Mas, mesmo para os materiais metálicos (com níveis de decaimento muito menores que carbono ou cerâmica), a ativação será consideravelmente menor que no caso de um reator a fissão. Segundo o *Fusion Policy Advisory Committee* do Departamento de Energia dos EUA (FPAC/DEA, 1990), o volume de lixo produzido por uma usina a fusão com 1,2 GW de potência será pelo menos um milhão de vezes menor que o produzido por um reator de fissão com o mesmo tamanho. Os reatores a fusão terão, um ano após sua desativação, aproximadamente um milionésimo da radioatividade dos reatores a fissão e cerca de um décimo-

milionésimo após cem anos. No caso de acidentes severos em usinas de fusão, a dose plausível de exposição *in-situ* deverá ser 2 a 3 ordens de magnitude menor que no caso de acidentes com usinas de fissão. A exposição ocupacional a altos campos magnéticos é um aspecto particular dos reatores a fusão baseados no confinamento magnético. Segundo Cramer (1983), em uma jornada de 8 horas diárias, a exposição a campos eletromagnéticos constantes deve ser limitada a 100 G (compare-se com o campo magnético da Terra, cerca de 0,5 G). Isto pode ser obtido simplesmente com precauções administrativas.

É difícil estimar o custo de um sistema que só estará disponível para uso geral dentro de várias décadas (IFRC/IAEA Status Report, 1990). O que parece claro é que o custo da eletricidade produzida por fusão vai ser dominado pelos custos de capital da usina, uma vez que o consumo de combustível do reatores a fusão vai ser muito pequeno. Por exemplo, a quantidade de combustível consumida para gerar 1 GWh de eletricidade numa usina de fusão é cerca de 35 gramas de lítio convertido em trítio e 10 gramas de deutério, contra 240 toneladas de petróleo ou 360 toneladas de carvão. De maior significância é a necessidade de substituir a primeira parede e o manto a intervalos regulares, que deve aumentar em muito o custo de operação da usina. Estimativas recentes indicam que a fusão será economicamente competitiva, principalmente se forem considerados os custos ligados segurança, ao meio ambiente e ao manuseio dos rejeitos radioativos (Maisonnier, 1989), (FPAC/DEA, 1990), (Chuyanov, 1990). A Fig.7 mostra uma comparação entre os custos estimados da energia produzida por fusão, fissão e uma gama de fontes renováveis de energia (Krakowsky, 1991).

EVOLUÇÃO DOS PROGRAMAS DE PESQUISA EM FUSÃO TERMONUCLEAR CONTROLADA

As primeiras reações nucleares em laboratório foram obtidas nos anos 30, pelo físico italiano Enrico Fermi, na Universidade de Chicago. Em 1938, enquanto Fermi recebia o prêmio Nobel por seus trabalhos com a transmutação de elementos, os químicos Otto Hahn e Fritz Strassmann obtinham, na Alemanha, as primeiras evidências das reações de fissão.

Aqueles foram anos brilhantes para a física nuclear, mas também anos sombrios para as nações, às vésperas da Segunda Guerra Mundial. Assim, naturalmente, os primeiros empenhos práticos para o aproveitamento da energia liberada pelas reações nucleares exotérmicas ocorreram dentro dos programas bélicos da Alemanha, dos EUA, da Inglaterra e da URSS.

As possibilidades de se empregar a energia liberada pelas reações de fissão e fusão como princípio de

bombas de alto poder de destruição foram consideradas quase que simultaneamente. Mas enquanto o desenvolvimento da tecnologia da fissão foi capaz de rapidamente produzir as bombas atômicas – e brindar ao mundo uma de suas mais nefandas memórias – o mesmo não ocorreu com a fusão. O primeiro teste com de uma bomba de fissão ocorreu a 16 de julho de 1945, no deserto do Novo México. Já os primeiros testes com as bombas H (baseadas na fusão termonuclear do hidrogênio) ocorreram ao final de 1952, em ilhas do Oceano Pacífico, passados portanto mais de 7 anos.

Somente em um segundo momento voltaram-se as pesquisas para o uso pacífico das novas tecnologias. Mais uma vez, a dificuldade de se realizar a fusão termonuclear de forma controlada revelou-se extraordinariamente maior que no caso da fissão. O primeiro reator nuclear foi construído na Universidade de Chicago, sob a direção de Enrico Fermi. Ao final de 1942, nele se obteve a primeira reação nuclear auto-sustentada. No início do anos 50, estava estabelecida a factibilidade da conversão da energia nuclear em energia elétrica, em uma série de reatores protótipos. Ao final da década, apareciam na Inglaterra e nos Estados Unidos os primeiros reatores comerciais.

Ao contrário, ainda hoje os aparatos de pesquisa em fusão termonuclear controlada dispõem mais energia do que aquela que se produz nas reações. Conquanto o ponto de empate deva ser atingido ainda na presente década, por três grandes máquinas atualmente em operação, mais de uma década nos separa das reações auto-sustentadas. Outras duas ou três décadas serão necessárias para se chegar a um reator comercial.

Mas antes de se falar dos passos que faltam para o reator, convém resenhar o caminho já trilhado. As reações exotérmicas de fusão foram descobertas nos anos 30. Em 1939, o físico americano Hans A. Bethe sugeriu que a fusão fosse a fonte da energia emitida pelas estrelas. Em 1942, a partir de discussões entre Enrico Fermi e Edward Teller, iniciou-se o Projeto Super, desenvolvido nos Laboratórios de Los Alamos e Oak Ridge. Como corolário deste projeto, em 1º de novembro de 1952, a primeira bomba H obliterou da paisagem uma ilha do Pacífico. Menos de um ano depois (15 de maio de 1957) a União Soviética realizava sua primeira explosão termonuclear. Em 1957, foi a vez da Inglaterra.

As pesquisas para o desenvolvimento da *fusão termonuclear controlada* (em contraposição às bombas H, onde as reações não são controladas) iniciaram-se logo após a Segunda Guerra, nos Estados Unidos, na URSS e na Inglaterra. Ao final da década de 50, no esteio da primeira tentativa de distensão militar entre americanos e soviéticos, os trabalhos com a a fusão

termonuclear controlada deixaram de ser segredo militar.

Mais especificamente, as pesquisas com a fusão termonuclear controlada baseada no confinamento de plasmas por campos magnéticos foram tornadas públicas na *Conferência sobre o Uso Pacífico da Energia Nuclear*, organizada pela *International Atomic Energy Agency* (IAEA), órgão das Nações Unidas, em Genebra, em 1958.

Olhando retrospectivamente os 38 anos que nos separam deste evento, pode-se distinguir três fases na evolução das pesquisas com a fusão termonuclear (Pieroni, 1991).

Na *fase inicial*, vários conceitos de máquinas foram concebidos e testados, no bojo de uma colaboração internacional intensa, sem precedentes históricos, que se iniciou a partir da Conferência de Genebra. Foi um período devotado à exploração de muitas diferentes idéias e configurações (como os *theta-pinches*, os *zeta-pinches*, os *stellarators*, os *espelhos*, os *cúspides*, os *esferomaks*) propostas para controlar a fusão em máquinas pequenas. Um tempo de grandes esperanças de se atingir a produção de energia com facilidade, e logo de grande desilusão, ao se constatar que a física dos plasmas era muito mais difícil de se entender – e o plasma um estado da matéria muito mais difícil de se manipular – do que inicialmente se supunha.

Algumas idéias subsistiram apenas por poucos meses, outras sobreviveram aos anos, até que, em 1968, foram divulgados os resultados de uma máquina russa, o tokamak T-3, fato que marca o início da *segunda fase* das pesquisas com a fusão.

Neste ano, na Conferência da IAEA, em Novosibirsk, os pesquisadores russos, encabeçados por L.A. Artsimovich, revelaram ao mundo que a obtenção de plasmas de alta temperatura, a densidades relativamente altas e com tempos de confinamento de dezenas de milissegundos podia ser conseguida em uma configuração que aliava plasmas de grande volume ao uso de campos magnéticos toroidais intensos.

Para os cientistas ocidentais, acostumados a taxas de difusão de energia duas ou três ordens de grandeza abaixo das apresentadas pelo T-3, estes resultados foram surpreendentes. Entretanto, com a pronta confirmação das novidades por um trabalho conjunto entre cientistas russos e britânicos, em pouco tempo desanuviou-se o ceticismo ocidental e tokamak foi adotado como linha mestra de pesquisas em todo o mundo. Alguns dos experimentos já existentes no ocidente foram convertidos em tokamaks, enquanto muitas novas máquinas apareceram, configurando o

que se pode chamar de *primeira geração de tokamaks* (Miyamoto, 1986) (T-4, T-6, ST, ORMAK, Alcator A, C, TFR, DITE, FT, JFT-2, JIPP T-II, entre outros).

O sucesso no entendimento da física dos tokamaks também propiciou o desenvolvimento de novas configurações de confinamento, como os RFP e os stellarators. Também durante este período, descobriu-se uma linha completamente diferente de se controlar as reações de fusão, baseada no confinamento inercial e no aquecimento de pelotas sólidas de hidrogênio por meio de raios *laser*. No entanto, a pesquisa da fusão por confinamento inercial permanece até hoje sob segredo militar, devido à ligação entre *lasers* e armamentos.

Ao contrário, as pesquisas baseadas no confinamento magnético testemunharam a possibilidade de os povos compartilharem construtivamente seus conhecimentos e recursos. As pesquisas sobre a fusão configuram um dos casos mais eloquentes do benefício advindo da colaboração entre países.

Com a entrada em operação da *segunda geração de tokamaks* (T-10, PLT, PDX, ISX-B, Doublet-III, ASDEX, entre outros), em meados da década de 70, a comunidade científica internacional constatou que, se por um lado o processo de se aumentar gradativamente o tamanho das máquinas e a intensidade dos campos magnéticos permitia antever uma via inequívoca de aproximar-se do reator, por outro, a lentidão com que os resultados intermediários podiam ser obtidos, a custos sempre crescentes, reenviava as previsões de se chegar ao reator sempre para a década seguinte.

Foi este o pano de fundo para a entrada em operação das grandes máquinas atuais (TFTR, JET, DIII-D, JT-60U, T-15, TORE-SUPRA, FTU, AS-DEX-U), em meados dos anos 80. O surgimento desta *terceira geração de tokamaks* marcou também o início da *terceira fase* das pesquisas em fusão, que se estende até hoje. O sucesso apresentado pelos programas de pesquisa dessas grandes máquinas tem sido crucial para desanuviar o ceticismo decorrente da ambiguidade de expectativas acima mencionada.

A ROTA PARA A FUSÃO

Para se ter idéia de quão próximo se está dos reatores, é inevitável a introdução de algum tecnicismo.

A principal "figura de mérito" usada para estabelecer a proximidade da ignição é a razão entre a potência gerada pelas reações de fusão D-T e a potência liberada pelo plasma. Em temperaturas relevantes para a ignição, em um plasma puro D-T, esta razão é proporcional ao triplo produto $n\tau T$ (recorda-se que n é a densidade iônica, τ é o tempo de confinamento da

energia do plasma e T a temperatura das partículas). A proximidade da ignição pode ser visualizada num diagrama $n\tau T$ versus T (Fig. 8). O menor valor de $n\tau T$ para atingir a ignição é $5 \cdot 10^{21} \text{ m}^{-3} \text{ s keV}$, a temperaturas da ordem de 15 keV.

Outra figura de mérito também usada é Q , definida como a razão entre a potência das reações de fusão e a potência externa requerida para aquecer e manter a temperatura do plasma. Curvas de Q constante também são mostradas na Fig. 8, assim como o desempenho já atingido em tokamaks (valores simultâneos de n , τ e T e a taxa de progresso bastante constante em direção ao objetivo da ignição. O produto $n\tau T$ cresceu duas ordens de grandeza entre 1978 e 1990. Nos melhores casos, menos que um fator de 10 separa da ignição, e está-se muito próximo do *break-even* – o ponto em que a potência produzida pelas reações D-T iguala-se à potência externa despendida para criar e aquecer o plasma (IFRC/IAEA Status Report, 1990). Além disso, em muitas experiências, τ excedeu os requisitos por um fator de dois ou mais (já se alcançou temperaturas de plasma de até 380 milhões de °C (Duchs, 1992)).

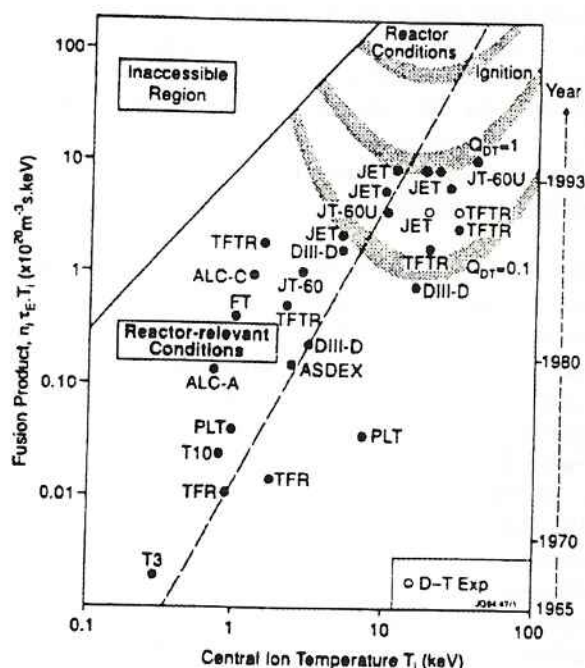


Fig. 8 Produto $n\tau T$ para diversos tokamaks (Rebut, 1990). Pode-se visualizar a aproximação do *break even* ($Q_{DT}=1$) e da ignição.

Progressos contínuos têm sido alcançados na direção do regime tokamak necessário para um reator. Tanto o TFTR, dos EUA, como o JET, da Comunidade Européia, distam menos que um fator de dois das condições de operação prospectadas para o *break-even*,

devendo alcançá-lo nas suas fases finais de operação. Além destas máquinas, também o tokamak japonês JT-60U objetiva chegar ao *break-even* antes do final deste século (Mori, 1989).

O JET (*Joint European Torus*) é o maior tokamak em operação no mundo (Fig. 6), e peça central do programa de pesquisas da Comunidade Européia. O projeto do JET foi iniciado em 1973, e a máquina entrou em operação dez anos depois.

Operando com um plasma de deutério, o JET já produziu cerca de 50 kW de potência de reações de fusão para um pulso de um segundo, contra 18 MW de energia despendida para aquecer o plasma. Se uma mistura de partes iguais de deutério e trítio fosse usada no lugar de deutério puro, a potência produzida pelas reações de fusão excederia 10 MW. Assim, o JET já está muito próximo do *break-even* e dista da ignição de um fator 6 (FPAC/DEA, 1990).

As primeiras experiências com fusão de plasmas D-T foram levadas a cabo pelo JET em novembro de 1991. O trítio foi injetado por meio de canhões de neutrons em um plasma de deutério previamente formado, atingido a fração de 11% da densidade do plasma e resultando na produção de cerca de 2MJ de energia oriunda de reações de fusão, com uma potência intantânea máxima de 1,7 MW e potência média de 1 MW, durante pulsos com duração de cerca de 2 segundos (Rebut, 1992b), (Bertolini, 1993), (Duchs, 1992).

Embora ainda distantes de um plasma em condições de reator, estes resultados foram reassegurantes, tanto no que concerne às questões físicas sobre o comportamento dos plasmas em ignição como no que diz respeito às questões tecnológicas, envolvendo o manuseio, a injeção e a recuperação do trítio remanescente nas paredes da câmara de vácuo (Rebut, 1992b).

Após estas primeiras descargas com plasmas de D-T, o JET voltou-se para o desenvolvimento de divertores magnéticos e o controle de impurezas, com a instalação de bobinas internas ao vaso, capazes de produzir um plasma com ponto X e, dessa forma, concentrar o fluxo de partículas em um divisor axissimétrico dotado de bombas criogênicas.

A operação com plasmas com iguais frações de deutério e trítio – a última fase de vida da máquina – inicialmente programada para iniciar em 1996 (Duchs, 1992) deve ser adiada para o final desta década (Keilhacker, 1994). Se, por um lado, isto retarda o atingimento do *break-even* (que só pode se dar na fase final *de facto*), favorece em contrapartida a obtenção de definições cruciais para a nova geração de tokamaks,

como o controle da densidade de impurezas e a exaustão das cinzas da reação (as partículas α).

Os principais tokamaks dos EUA são o TFTR, de Princeton e o DIII-D, da General Atomics, ambos responsáveis por muitas das principais inovações e marcas de desempenho deste tipo de máquina (Clarke, 1989). Dos grandes tokamaks em operação o DIII-D foi o que atingiu o mais alto β , 11%, usando um plasma extremamente alongado $a/b=2,35$. Além disso, a máquina tem um papel fundamental na pesquisa de modos avançados de confinamento.

No TFTR, em operação desde 1982, já se produziu 50 kJ de energia, em pulsos com 50 kW de potência de reações de fusão D-D. Operando com D-T, o TFTR vai produzir o *break-even* com pulsos de 10-30 MW de potência, gerando de 10 a 30 MJ de energia por pulso (FPAC/DEA, 1990).

Em dezembro de 1993, o TFTR realizou seus primeiros pulsos em D-T. Usando pela primeira vez no mundo um plasma com iguais concentrações de deutério e trítio, o TFTR alcançou um pico de potência de 6 MW, às expensas de 30 MW de potência externa (Time Magazine, 1993), (Strachan, 1994).

O PRÓXIMO PASSO

Atualmente o mundo vive um momento singular nas pesquisas sobre a fusão, coroando o esforço iniciado nos anos 50. A pesquisa chegou ao ponto de maturidade onde, se não se tem resposta segura a todas as questões tecnológicas, já se pode delinear-las com clareza. Além disso, a busca de soluções para os problemas científicos e tecnológicos remanescentes é feita de forma orquestra entre os países industrializados.

Todos os grandes programas de pesquisa do mundo (EUA, Comunidade Européia, Japão e Rússia) objetivam chegar, em tempo hábil, à construção de reatores protótipos, tendo em vista ainda sua produção industrial e sua comercialização. Para tanto, buscam inicialmente desenvolver as bases de dados científica e tecnológica necessárias para construir e operar um tokamak que atinja a queima auto-sustentada de um plasma D-T em pulsos longos, e testar as tecnologias com possível emprego num futuro reator de demonstração.

O processo para demonstrar a factibilidade (ou viabilidade) dos reatores a fusão pode ser dividido em três estágios: (1) demonstração da *factibilidade científica*, (2) demonstração da *factibilidade tecnológica* e (3) demonstração da *factibilidade comercial* (IFRC/IAEA Status Report, 1990).

Nos grandes tokamaks atuais lida-se principalmente com a factibilidade científica, que no entanto somente será definitivamente comprovada quando, num reator experimental, forem atingidos tanto a ignição como o controle de um plasma queimando deutério e trítio durante pulsos longos, em condições de plasma relevantes para um reator de potência. Este reator experimental será também a principal peça para a demonstração da factibilidade tecnológica da fusão.

é usual referir-se a máquinas com este conceito como “reator tipo *Next Step*” (NS). Os reatores NS estão entrando em fase de projeto de engenharia. Apenas após a operação satisfatória de um destes reatores é que planos precisos poderão ser traçados para o desenvolvimento de um reator protótipo (o reator “DEMO”), visando completar a demonstração da factibilidade tecnológica da fusão e, possivelmente, já a sua factibilidade econômica.

Mais especificamente, as principais questões tecnológicas a serem enfrentadas para se chegar ao reator a fusão são (IFRC/IAEA Status Report, 1990), (Duchs, 1992), (Rebut, 1992a), (Rebut, 1992b): a produção de plasmas em condições relevantes para os reatores, implicando a habilidade de controlar pulsos operacionais cada vez mais longos; a ignição e o controle da queima por longos períodos; a demonstração do equilíbrio do plasma em condições estacionárias; a demonstração das funções dos divertores e do manto; a estimativa da vida útil dos componentes; o desenvolvimento de materiais adequados e, finalmente, a produção econômica de eletricidade.

Com esses objetivos em comum, e dado o histórico de colaboração das pesquisas em fusão, naturalmente os programas nacionais convergiram para um consórcio, visando a construção de apenas uma máquina NS que pudesse atender às estratégias comuns a todas as partes. Esta máquina, atualmente em fase de Projeto de Engenharia, chama-se ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*), um projeto científico e tecnológico com esforços de magnitude somente equiparáveis ao Projeto Apolo.

É interessante resenhar as etapas que levaram à convergência internacional do Projeto ITER. Paralelamente às experiências com máquinas de pesquisa em física de plasmas, os países industrializados desenvolveram, desde a década de 70, uma série de estudos conceituais de reatores a fusão, com o objetivo de delinear os problemas de engenharia e os requerimentos tecnológicos, tirando proveito da interação com os programas de pesquisa em física de plasmas e de desenvolvimento de tecnologias, e auxiliando estes programas a simplificar e melhorar seus aspectos de engenharia.

A cada momento, a magnitude do esforço empenhado nos projetos conceituais foi, grosso modo, proporcional à maturidade dos conceitos de confinamento do plasma. O grosso do trabalho de estudos conceituais foi, é claro, concentrado no projeto de máquinas NS, enquanto um número mais reduzido de estudos dedicou-se a antecipar as características dos reatores comerciais.

O primeiro projeto conceitual desenvolvido nos Estados Unidos foi o EPR (*Experimental Power Reactor*), entre 1974 e 1977. O TNS (*The Next Step*), desenvolvido de 1976 a 1978, foi um esforço para aperfeiçoar os conceitos do EPR. Foi provavelmente a partir dessa máquina que convencionou-se, espontaneamente, de se chamar as máquinas que devem suceder à atual geração de tokamaks, precisamente, “*the Next Step*”. Em seguida, projetou-se o ETF (*Engineering Test Facility*), entre 1978 e 1980.

Concomitantemente a estes projetos, o Japão desenvolveu os projetos do PETF (*Plasma Engineering Test Facility*) e do EPR (*Experimental Power Reactor*), ambos entre 1976 e 1978. A então URSS, por sua vez, desenvolveu, por muitos anos, e até 1979, o T-20.

Um fator de estímulo à colaboração internacional foi a crise do petróleo em 1973, que reforçou os compromissos entre os grandes países industrializados, temerosos da dependência de um insumo tão suscetível à crises regionais. A crise do petróleo, aliada ao clima de distensão política entre EUA e URSS ao final da década de 70, levou à assinatura do primeiro convênio internacional de projeto conceitual de reator, envolvendo os Estados Unidos, a União Soviética, o Japão e a Comunidade Européia.

O Convênio para a construção do INTOR (*International Tokamak Reactor*) foi firmado em 1978, sob os auspícios da IAEA. As atividades de projeto iniciaram-se em 1979, com uma configuração preliminar concluída em 1981. Uma série de revisões fez o projeto extender-se até 1988, envolvendo centenas de laboratórios, universidades e indústrias ao redor do mundo.

Ao contrário da maioria dos estudos anteriores, os estudos do INTOR foram baseados desde o princípio em extrapolações modestas dos conhecimentos de física de plasmas e das tecnologias da época, e tiveram um papel fundamental na definição das prioridades das atividades de pesquisa e desenvolvimento que o sucederam.

Ao convergirem para um programa de colaboração internacional, os programas domésticos e projeto de máquinas NS foram afetados profundamente. No caso da URSS, após 1979 o time de projeto foi incorporado de forma praticante integral às atividades do INTOR.

Um projeto NS doméstico, o OTR, defasou-se em relação aos outros grandes projetos mundiais, em função da crise sócio-econômica da URSS. No Japão, desenvolveu-se entre 1981 e 1892 o projeto do FER (*Fusion Experimental Reactor*).

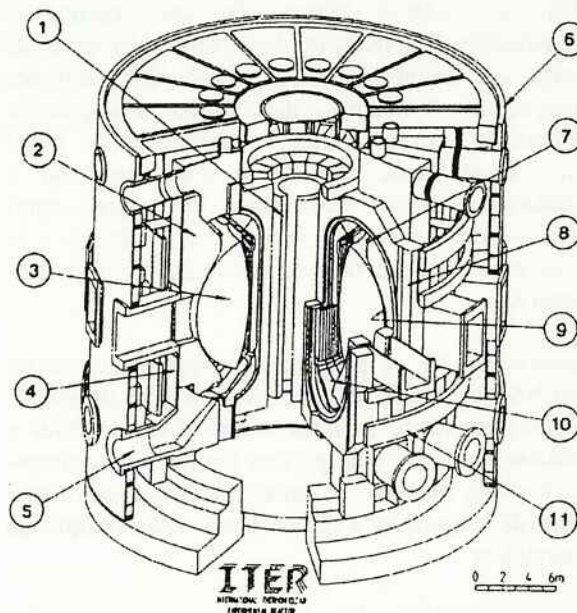
Por sua vez, os EUA projetaram o FED (*Fusion Engineering Device*), entre 1980 e 1981. O FED de fato representou a contribuição norte-americana ao projeto do INTOR, tanto que os trabalhos publicados na época faziam a referência ao "FED/INTOR". Mais recentemente, com os esforços de se buscar a ignição em uma máquina internacional, o programa doméstico dos EUA desenvolveu o CIT, que visava atingir a queima do plasma na menor máquina possível.

Também a Europa seguiu uma via de duas mãos, desenvolvendo o projeto do NET (*Next European Torus*). Os trabalhos iniciaram-se em 1979, estendendo-se até 1992, primeiro como parte das atividades do INTOR e depois do ITER. Ainda neste caso, as publicações da época faziam referência primeiro ao NET/INTOR e, após, ao NET/ITER. Uma máquina semelhante ao CIT, o IGNITOR, também vem sendo proposta há alguns anos.

Finalmente, em 1985, no encontro Reagan-Gorbachev, em Genebra, firmou-se um acordo entre EUA e URSS para o desenvolvimento do projeto e possível construção de uma máquina NS. Em 1987, o acordo foi estendido à Comunidade Européia e Japão. Em 1988 foram iniciadas as "Atividades de Projeto Conceitual" (APC) do *International Thermonuclear Experimental Reactor* (ITER).

Este consórcio, uma continuação natural dos esforços do INTOR, tem por objetivo confirmar plenamente a factibilidade científica da fusão e estabelecer a factibilidade tecnológica de muitos aspectos dos reatores. A máquina é concebida para ignição controlada e pulsos longos de queima de plasmas D-T, e para executar testes em componentes necessários para um reator a fusão de potência. O núcleo das instalações do ITER será uma máquina tokamak (Fig. 9). Seus principais parâmetros são dados na Tabela 1 onde também se faz uma comparação com os parâmetros dos tokamaks TFTR, JET e JT-60.

As APC do ITER foram concluídas em dezembro de 1990. O acordo para o início das "Atividades de Projeto de Engenharia" (APE) foi firmado pelas quatro partes envolvidas nas APC, em 21 de julho de 1992, com a Federação Russa assumindo as responsabilidades da já extinta União Soviética. As APE, desenvolvidas em três sedes distintas - *San Diego, Garching e Naka* - devem estender-se até 1997, e a construção da máquina



- | | |
|---------------------------------|--------------------------------|
| 1 - Solenoide Central | 7 - Bobinas de controle |
| 2 - Blindagem/Manto | 8 - Bobinas de Campo Toroidal |
| 3 - Plasma | 9 - Primeira Parede |
| 4 - Câmara de Vácuo / blindagem | 10 - Placas do Divertor |
| 5 - Exaustão do plasma | 11 - Bobinas de Campo Poloidal |
| 6 - Câmara Criostática | |

Fig. 9 Arranjo geral do ITER (IFRC/IAEA Status Report, 1990).

Tabela 1 Parâmetros do ITER

Parâmetro	Unidade	Valor
Raio maior	m	6,0
Raio menor	m	2,15 (H) 4,3 (V)
Campo toroidal no eixo	T	4,85
Corrente de plasma	MA	22,0
Duração do pulso	s	2000
Aquecimento adicional:	MW	
Canhões de nêutrons		75
ICRH		115
LH		45
ECRH		20

(sobre a qual não existe ainda acordo firmado) atingirá os meados da próxima década (Post, 1992).

Estima-se que o projeto e o desenvolvimento de tecnologias para o ITER consumam 1,5 bilhões de dólares (janeiro de 1989), mais 4,9 bilhões para a construção e 400 milhões de dólares anuais durante a operação.

PRINCIPAIS QUESTÕES TECNOLÓGICAS DO REATOR NS

O reator NS deverá integrar as respostas para uma série de questões tecnológicas em um projeto coerente, que atenda aos requerimentos mecânicos e aos limites de

custos, ao mesmo tempo em que garanta a confiabilidade de operação. Sua construção deve ser baseada em conhecimentos já ratificados, evitando extrapolações. A máquina deve atingir alto grau de simplicidade, confiabilidade e segurança, e ainda prover flexibilidade de acesso para inspeção e manutenção remota, por meio de equipamentos robóticos de tamanho excepcional, capazes de funcionar confiavelmente em um ambiente altamente radioativo.

É consenso entre os pesquisadores que o sucesso do reator NS depende do desenvolvimento e um sistema de divertores capaz de suportar o alto fluxo de calor e partículas expelidas pelo plasma em queima termonuclear à plena potência, e capaz ainda de controlar o influxo de impurezas e remover as cinzas da queima termonuclear.

Além do problema dos divertores, outras questões tecnológicas em aberto são a definição da forma de operação do reator (contínua ou pulsada), o controle e a minimização do efeito das disrupturas e o desenvolvimento das tecnologias e dos materiais avançados para os componentes da primeira parede e do manto, da estrutura mecânica e das bobinas supercondutoras.

Os parâmetros do ITER propostos nas Atividades de Projeto Conceitual estão sendo revisados na atual fase de Atividades de Projeto de Engenharia. O tamanho e o desempenho do reator termonuclear são definidos em linhas gerais pelas restrições da atual tecnologia e pela extrapolação dos resultados obtidos com a presente geração de máquinas de pesquisa. Para reduzir os riscos das previsões dos modelos semi-empíricos da física do reator, a razão de aspecto e a elongação do ITER devem ser semelhantes aos valores dos grandes tokamaks em operação, como o JET e o DIII-D, isto

$$\text{é, } A \cong 3, \quad \frac{a}{b} \cong \frac{3}{2}.$$

O protótipo do reator deverá queimar um plasma D-T à temperaturas de cerca de 25 keV e à densidades maiores que 10^{20} m^{-3} , produzindo hélio como cinza. Para tanto, delineia-se atualmente (Rebut, 1992b), (Keen, 1993) um tokamak com corrente de plasma de até 24 MA, campo toroidal de 6T no eixo do plasma, raio maior de cerca de 7,7m e raio menor do plasma de cerca de 3,0m, com elongação de cerca de 1,6. A remoção da energia e o controle das impurezas serão realizados com a operação em uma configuração com ponto X, com divisor bombeado, de alta densidade. A aproximação da ignição poderia utilizar aquecimento de ressonância ciclôtrônica, de relativamente baixa potência. Pulsos longos em ignição (cerca de meia hora, com potências bem acima de 1GW, para permitir o estudo do domínio da ignição) seriam efetuados para

testar módulos do manto sujeitos a fluxos de potência acima de 1 MW/m^2 . Protótipos avançados de divertores e novos conceitos de confinamento também serão testados.

PROJETOS CONCEITUAIS DE REATORES COMERCIAIS

Além do projeto conceitual das máquinas NS, foram efetuados, desde 1972, quase duas dezenas de projetos conceituais de reatores comerciais, principalmente nos Estados Unidos, mas também na Europa e Japão (Stacey, 1984). Dentre estes, destacam-se o NUWMAK (EUA, 1979), o MkiIB (Inglaterra, 1979) o STARFIRE (EUA, 1980) o SPTR-P (Japão, 1981) e, mais recentemente, o ARIES e o TITAN (este um reator tipo RFP), ambos levados a cabo no início da década de 90 pelos EUA (Krakowsky, 1991).

Baseados em extrapolações às vezes modestas, às vezes audazes da física e da tecnologia do momento, os primeiros estudos previam sistemas muito grandes, com alta potência recirculante, necessária para compensar a dissipação nas bobinas convencionais assumidas. Com o advento das bobinas supercondutoras e a evolução dos programas de pesquisa e desenvolvimento e dos projetos de máquinas NS, o tamanho antecipado para os futuros reatores foi convergindo para o tamanho das máquinas existentes à época (como mostra a Fig. 10, extraída de (Stacey, 1984)).

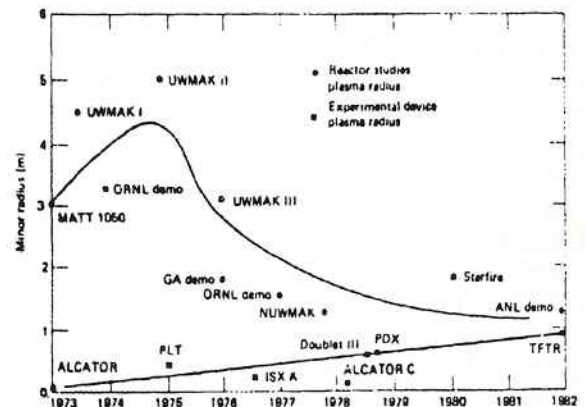


Fig. 10 Evolução dos projetos de reatores tokamak. Extraído de Stacey (1984).

A Fig. 11, por sua vez, mostra como a relação entre a potência produzida e o volume ou o peso dos conceitos de reatores comerciais foi evoluindo, desde o pioneiro UWMAK-I até os atuais, que apresentam densidades de potência equiparáveis aquelas de reatores a fissão avançados.

PESQUISAS NO BRASIL E EM OUTROS PAÍSES

Embora tenham sido os programas de fusão dos quatro parceiros do ITER que sempre se destacaram em termos mundiais, países como a Austrália, o Canadá, a China, a Índia e o Brasil também mantêm programas de pesquisa em fusão, ligados ao panorama mundial através de acordos bi ou multilaterais. Destes países, no entanto, o único que participa diretamente no projeto da máquina NS é o Canadá.

No que diz respeito ao Brasil, a pesquisa em física de plasmas iniciou nos anos 50, na USP (SBF, 1990). Os anos 70 marcaram o surgimento dos grupos de pesquisa da USP, UNICAMP, UFRGS, ITA e INPE. A *Escola de Verão sobre Física de Plasmas*, realizada em 1978 na Universidade Federal Fluminense, foi um marco importante (Nascimento, 1979). Em 1980, o tokamak TBR-1 começou a operar na USP (Fiedler-Ferrari, 1987). É uma máquina pequena, empregada para o desenvolvimento de diagnósticos, pesquisa de instabilidades magnetohidrodinâmicas do plasma e interação plasma-parede. Iniciativas inter-institucionais para a produção de um tokamak maior e a criação de um *Laboratório Nacional de Plasmas* (1981-CNEN; 1986/87, Ministério de Ciência e Tecnologia) redundaram em algumas reuniões e na erosão das verbas alocadas, por efeito da inflação (SBF, 1990).

O consórcio estabelecido em 1991 entre a USP, a UNICAMP e o INPE para a construção do Tokamak Brasileiro Esférico, ou TBR-E, procurou inserir o Brasil na pesquisa de ponta em física de plasmas, através da construção de uma máquina com características muito pouco exploradas (associadas principalmente à baixa razão de aspecto dos plasmas a serem gerados).

Infelizmente, mesmo tendo sido o projeto aprovado em mérito pela FINEP, as verbas para a construção do TBR-E não se efetivaram, levando o IFUSP a adquirir o tokamak TCA, da Escola Politécnica Federal de Lausanne, enquanto o INPE desenvolve, com verbas próprias, o projeto do tokamak ETE (*Experimento Toroidal Esférico*). Embora menos ambicioso que o TBR-E, este novo projeto manterá muitas das soluções de engenharia do projeto precedente.

“BACK TO THE FUTURE”

Conquanto haja problemas em aberto, os resultados angariados em 4 décadas de pesquisas mostram que a aproximação aos reatores é inequívoca. Vive-se atualmente um momento singular na rota para o reator, coroando a jornada iniciada nos anos 50. A próxima década deve testemunhar o advento do primeiro to-

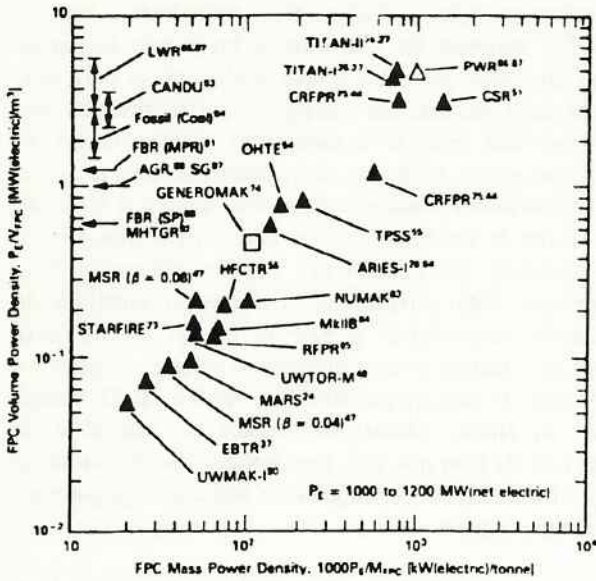


Fig. 11 Densidades de potência previstas por diversos projetos conceituais de reatores comerciais a fusão. Também são indicadas as densidades de potência de reatores a fissão avançados (PWR, LWR, CANDU, FBR, AGR, MHTGR). Extraído de (Krakowsky, 1989).

Finalmente, a Fig. 12 compara a seção transversal do núcleo de um reator a fissão PWR avançado com aquelas dos projetos conceituais de reatores comerciais a fusão. São usados na comparação o STARFIRE (um dos primeiros projetos conceituais), o ARIES (um projeto conceitual recente), o TITAN (um projeto recente, tipo RFP) e o ITER (a máquina NS). Estão indicadas ainda a potência térmica liberada pelo reator e a fração convertida em potência elétrica.

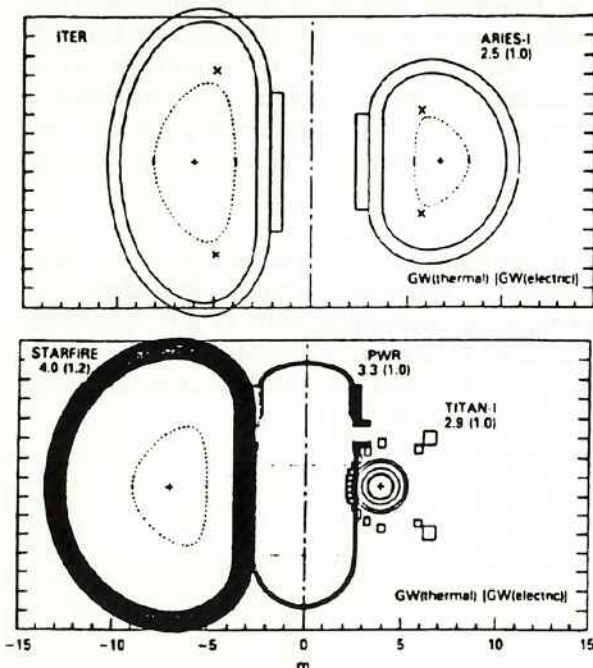


Fig. 12 Comparação entre os tamanhos dos projetos conceituais STARFIRE, ARIES e TITAN com o ITER e com um reator a fissão PWR avançado. Extraído de (Krakowsky, 1989).

kamak a atingir as reações de fusão auto-sustentadas, o ITER.

Outras duas ou três décadas serão necessárias para se chegar a um reator comercial. Um relatório recente do Departamento de Energia dos EUA (FPAC/DEA, 1990) afirma que “há razões persuasivas para que os EUA se dediquem ao desenvolvimento de um programa de fusão (...) que possa atingir o objetivo de pelo menos um Reator de Potência Demonstrativo por volta de 2025 e pelo menos uma Usina Comercial de Potência por volta de 2040”. Estas datas podem ser tomadas como referências fundamentadas para a consecução dos ambiciosos objetivos da fusão termonuclear controlada.

Neste trabalho, procurou-se mostrar-se como a lógica persuasiva em torno dos reatores a fusão pauta-se na necessidade de suprir a sociedade industrial do próximo milênio com suficiente energia, sem contudo prosseguir-se com o atual processo de deterioração do meio ambiente. Todavia, embora a primeira geração de reatores a fusão deva envolver muito menos radioatividade que os reatores a fissão, ainda assim a radioatividade estará presente, pois estes reatores conterão trítio e produzirão neutrons, que irão ativar os materiais do reator. Mas a reação D-T não é única reação em que se pode basear um reator de fusão. Na reação



os produtos são todos inertes, com exceção de uma quantidade muito pequena de neutrons, associados à uma fração das reações secundárias D+D.

Conquanto a reação D+He³ requeira temperaturas e tempos de confinamento maiores que a reação D+T, logo apresente maiores dificuldades tecnológicas para sua realização, não se vislumbra nenhum verdadeiro impedimento. O principal problema é que o He³ é um isótopo praticamente inexistente na Terra, e não há método para sua produção, ao contrário do trítio. Mas as investigações efetuadas na superfície solar durante as últimas duas décadas mostraram que o vento solar implantou grandes quantidades de He³ na lua (Momota, 1993). O teor energético do ciclo do He³ é tão alto que a sua extração e o transporte até a Terra já seriam economicamente viáveis com os níveis atuais de tecnologia espacial (Chuyanov, 1990). Assim, talvez a fusão ofereça a motivação econômica que falta para a colonização da lua.

Por que não ir direto para esta reação? Na verdade, ao se construir um reator D-T, está-se aproximando de forma direta dos reatores mais avançados. O único desenvolvimento dos primeiros reatores desnecessário para os reatores avançados será o ciclo de geração de trítio, via manto alimentador de lítio.

Termina-se este trabalho por reconhecer que os desafios surgidos na rota para a fusão não foram de todo dirimidos pelos tokamaks atuais, razão pela qual ainda uma geração de máquinas e três décadas nos separam dos reatores demonstrativos de potência. O próximo passo, a ignição do plasma em uma máquina trabalhando em condições de reator, requer o aumento do tempo de confinamento do plasma em uma ordem de grandeza em relação aos maiores tokamaks hoje existentes. Isto corresponde a dobrar o tamanho do tokamak, aumentando o raio maior do plasma para mais de 6 metros e multiplicando o volume, o peso e a demanda de energia por um fator de 8 a 10. O mesmo fator se aplica, afinal, aos custos de capital e de operação da máquina NS, que demandará empenhos de capital e humanos de magnitude somente equiparáveis ao Projeto Apollo.

Como até o presente não existe uma teoria bem estabelecida para explicar os fenômenos de transporte em plasmas a altas temperaturas, não se pode prever exatamente os parâmetros do plasma nas novas condições e, portanto, pode parecer aventuroso construir-se protótipo tão dispendioso, definido com base numa fenomenologia de eventos a partir da qual se extrapola – sem certeza – as condições do reator. No entanto, conforme V. A. Chuyanov (Chuyanov, 1990), não é assim: foi justamente pela via empírica que se conseguiu o progresso presentemente atingido. “A humanidade não tem, até hoje, uma teoria da turbulência, o que não impede que usemos tubulações e outros dispositivos onde ocorram fluxos turbulentos”, na metáfora do cientista russo. É claro que não se trata aqui de tubulações, mas de protótipos cujo custo não deve diferir muito de uma central nuclear a fissão de mesma de potência, isto é, 1 GW. Justamente por se tratar de um protótipo, o risco do empreendimento é grande: “nunca antes a humanidade lidou com um programa de P&D onde o mínimo protótipo custasse bilhões de dólares”.

Mas é justamente este grau de empenho sem precedentes, exigindo co-responsabilidade e estreitamento da colaboração entre os povos, para uso mais eficiente de cérebros e potencial econômico, que faz da busca da fusão termonuclear controlada uma aventura tão fascinante.

BIBLIOGRAFIA

- BERTOLINI, E. "The JET Project: Progress Toward a Tokamak Thermonuclear Reactor". JET-P(93)02, Jan. 1993.
- CALDIROLA, P. et al. *Il Fuoco della Fusione Termonucleare Controllata*. Arnoldo Mondadori Editore SpA, Milano, 1984.
- CHUYANOV, V.A. "Routes to controlled fusion on the basis of tokamaks". *Plasma Devices and Operation*, v. 1, 5-10 (1990).
- CLARKE, J.F. & HAAS, G.M. "The U.S. Program for Fusion Nuclear Technology Development". *Fusion Engineering and Design*, v.8, North-Holland, Amsterdam, 1989.
- CLOUD, P. *El Cosmos, la Tierra y el hombre - Breve historia del Universo*. Alianza Editorial, Madrid, 1981.
- COHEN, S. & CROCKER, J.G. "Overview of Fusion Reactor Safety". *6th Int. Conf. on Structural Mechanics in Reactor Technology*. Paris, 1983. Proceedings.
- COMMISSARIAT A L'ÉNERGIE ATOMIQUE. *La Fusión Termonuclear Controlada por Confinamiento Magnético*. Masson, Paris, 1987.
- CRAMER, B.A. "Mechanical and Thermal Design Aspects of the Fusion Engineering Device (FED)". *6th Int. Conf. on Structural Mechanics in Reactor Technology*. Paris, 1983. Proceedings.
- DOLAN, T.J. *Fusion Research - Principles, Experiments and Technology*. Pergamon Press, New York, 1982.
- DONATO, A. "Fusion and Fission Nuclear Power Reactor: an attempt to compare the radioactive waste environmental impact". RT/NUCL/91/29. ENEA, Italy, 1992.
- DUCHS, D. & HELLSTEN, T. "Status and Prospects of Controlled Thermonuclear Fusion". JET-P(92)88, Oct. 1992.
- FIEDLER-FERRARI, N. & NASCIMENTO, I.C. *Fusão Termonuclear Controlada*. IFUSP/P-664, out/1987. Publicado na Revista Ciência Hoje.
- FPAC/DEA - FUSION POLICY ADVISORY COMMITTEE (FPAC), Department of Energy, USA. Final Report. Sept., 1990.
- IFRC/IAEA - *Status Report on Controlled Thermonuclear Fusion - Executive Summary and General Overview*. The International Fusion Research Council, International Atomic Energy Agency (IAEA), Vienna, 1990.
- IYOSHI, H. et al. "Innovative Energy Production in Fusion Reactors". NIFS-250. National Institute for Fusion Science. Nagoya, 1993.
- JJU - JET JOINT UNDERTAKING. Annual Report 1984. EUR10222EN, Oxon, U.K., aug. 1985.
- KEEN, B.E. & WATKINS, M.L. "Present State of Nuclear Fusion Research and Prospects for the Future". JET-P((93)67, September 1993. Preprint of a paper submitted for publication in *Power Engineering*.
- KEILHACKER, M. "The JET Programme to 1996 and Beyond". JET-P(94)13, JET Joint Undertaking, Oxon, 1994.
- KENNEDY, P. *Preparando para o século XXI*. Ed. Campus, S.P., 1993.
- KRAKOWSKY, R.A. "Progress in Commercial Magnetic Fusion Energy Reactor Designs". *Fusion Technology*, v.20, 1991.
- KRALL, N.A. & TRIVELPIECE, A.W. *Principles of Plasma Physics*. San Francisco Press, Inc. San Francisco, 1986.
- LUDWIG, G.O. "The Proto-ETA Small-Aspect-Ratio Experiment". *IAEA Technical Meeting on Small Tokamak Research*. Washington DC, 1990. Proceedings.
- LUDWIG, G. O. "Anteprojeto de engenharia do tokamak ETE". NPE-5529-PRE/1796. INPE, São José dos Campos, Novembro 1993.
- MAISONNIER, C. & TOSCHI, R. "Overview of the European Fusion Program". *Fusion Engineering and Design*, v.8, North-Holland, Amsterdam, 1989.
- McCRORY, Jr., R. L. "Energy Supply and Demand in the Twenty-first Century". *Journal of Fusion Energy*, v.8, n. 1/2, 1989.
- MIYAMOTO, K. *Plasma Physics for Nuclear Fusion*. The MIT Press, Cambridge, Ma., 1986.
- MOMOTA, H. et al. "Characteristics of D-³He Fueled FRC Reactor: ARTEMIS-L". NIFS-251. National Institute for Fusion Science. Nagoya, 1993.
- MORI, S. "Japanese Program for Fusion Nuclear Technology Development". *Fusion Engineering and Design*, v.8, North Holland, Amsterdam, 1989.
- NASCIMENTO, I. C. "Fusão Nuclear Controlada". *Física de Plasmas, vol. II*. Organizado por Abrahan C. et al., Universidade Federal Fluminense, Niterói, 1979.
- NASCIMENTO, I.C. et al. *The TBR-E Project - Basic Engineering Design*. IFUSP/INPE/UNICAMP, dec., 1991. Relatório.
- NASCIMENTO, I.C., CALDAS, I.L., GALVÃO, R.M.O. "Tokamak Research at University of São Paulo". *Jour. of Fusion Energy*, Vol. 12, No. 3, 1993.
- NASCIMENTO, I.C. et al. "Project TCA-BR: A Middle Size Tokamak Facility in Brazil". *1994 International Conference on Plasma Physics & VI Latin American Workshop on Plasma Physics*. Foz do Iguaçu, November 1994. Proceedings.
- PAULETTI, R.M.O. *Projeto Estrutural de Reatores a Fusão: Passado, Presente e Futuro*. Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Engenharia. São Paulo, 1994.
- PAPASTERGIOU, S. et al. "Materials selection, qualification and manufacturing of the in-vessel divertor cryopump for JET". JET-P(93)51, June 1993.
- PIERONI, L. "The tokamak approach to fusion: problems and perspectives". *XX International Conference in Ionized Gases*. Pisa, 1991. Proceedings.
- POST, D. "Physics basis of the ITER Conceptual Design". *V Latin American Workshop on Plasma Physics*. Mexico, July, 1992.
- REBUT, P. et al. "A Program Towards a Fusion Reactor". JET-P(90)75, JET Joint Undertaking, Oxon, U.K., 1990.
- REBUT, P-H. et al. "The key to ITER: the Divertor and the First Wall". JET-P(93)06, Jan. 1993. *Int. Conf. on New Ideas in Tokamak Confinement*. La Jolla, Ca., Jan. 1992a. Proceedings.
- REBUT, P-H. et al. "The ITER Challenge". *17th Symposium on Fusion Technology*, Rome, Sept. 1992b. Proceedings.
- SBF - *A Física no Brasil na Próxima Década*. Sociedade Brasileira de Física, Instituto de Física da USP, São Paulo, 1990.
- STACEY, Jr., W.M. *Fusion - An Introduction to the Physics and Technology of Magnetic Confinement Fusion*. John Wiley & Sons, New York, 1984.

STRACHAN, J.D. et al. "Fusion Power Production from TFTR Plasmas Fueled with Deuterium and Tritium". PPL-2978, Princeton University, 1994.

Summary of the Workshop on the Evaluation of the TBR-E Project. Universidade de São Paulo, Instituto de Física, São Paulo, dec. 2-6, 1991. Relatório.

TAYLOR, N.P. & COOK, I. "Potential hazard identification for a generic fusion power station: reduction of hazard list". AEA-FUS 252. AEA Technology, Culham, 1993.

TELLER, E. (editor). *Fusion - Magnetic Confinement*. Academic Press, New York, 1981.

TIME International Magazine N. 51. Dec. 20, 1993.

TOMABECHI, K. "Energy resources in the future". *Fusion Engineering and Design* 34 (1994).

BOLETINS PUBLICADOS

- 8501 - "Métodos Variacionais Aplicados à Estabilidade dos Taludes e Fundações" - JOSÉ CARLOS DE FIGUEIREDO FERRAZ
- 8502 - "O Processo de Cross Derivado do Método dos Deslocamentos" - JOÃO CYRO ANDRÉ
- 8503 - "Fundações por Bloco" - JOSÉ CARLOS DE FIGUEIREDO FERRAZ
- 8504 - "Investigação Experimental sobre o Valor Limite Wu das Tensões de Cisalhamento no Concreto Estrutural" - PÉRICLES BRASILIENSE FUSCO
- 8505 - "Investigação Experimental sobre o Cisalhamento em Lajes de Concreto Armado" - PERICLES BRASILIENSE FUSCO
- 8506 - "Cálculo das Alterações de Tensão, ao Longo do Tempo, nas Peças de Concreto Protendido: Procedimentos Diretos, Simples, Alternativos ao do CIB" - JOSÉ CARLOS DE FIGUEIREDO FERRAZ
- 8507 - "Elementos de Cálculo Variacional e suas Aplicações nas Estruturas" - JOSÉ CARLOS DE FIGUEIREDO FERRAZ
- 8508 - "Spline Cúbico e suas Aplicações" - CARLOS ALBERTO SOARES
- 8509 - "Correlação Paramétrica Deformatória Flexão Composta, Concreto Armado" - PIETRO CANDREVA
- 8510 - "Lugares Geométricos Notáveis na Flexão Composta - Concreto Armado - PIETRO CANDREA
- 8511 - "Regiões Deformatórias Notáveis Flexão Composta - Concreto Armado" - PIETRO CANDREVA
- 8512 - "Diagramas Momentos - Curvaturas Flexão Composta Normal - Seções Retangulares Armadura Qualquer nas Barras" - PIETRO CANDREVA
- 8601 - "Alterações, ao Longo do Tempo, dos Estados de Tensão nas Seções de Concreto, Armadas para Diferentes Etapas de Carregamento" - JOSÉ CARLOS DE FIGUEIREDO FERRAZ
- 8602 - "Peças de Concreto Armadas com Barras Protendidas" - JOSÉ CARLOS DE FIGUEIREDO FERRAZ
- 8603 - "A Relaxação do Concreto e a Redistribuição das Tensões nas Peças Armadas" - JOSÉ CARLOS DE FIGUEIREDO FERRAZ
- 8604 - "Análise Não Linear de Treliças Especiais" - PAULO DE MATTOS PIMENTA
- 8605 - "Variação, no Tempo, do Estado de Tensão nas Seções de Concreto Armado" - JOSÉ CARLOS DE FIGUEIREDO FERRAZ
- 8606 - "Evolução ao Longo do Tempo, das Tensões de Cisalhamento nas Vigas de Concreto Protendido" - JOSÉ CARLOS DE FIGUEIREDO FERRAZ
- 8607 - "Cômputo de Fluência por Problemas de Estabilidade" - JOSÉ CARLOS DE FIGUEIREDO FERRAZ
- 8608 - "Erros Usuais Cometidos nas Determinações das Tensões de Cisalhamento nas Peças de Altura Variável" - JOSÉ CARLOS DE FIGUEIREDO FERRAZ
- 8609 - "Contribuição da Fluência do Aço, da Fluência e Retração do Concreto nos Deslocamentos Devidos à Flexão, nas Peças de Concreto Protendido" - JOSÉ CARLOS DE FIGUEIREDO FERRAZ
- 8610 - "Sistema VX-IQB para Processamento de Textos Científicos" - IVAN DE QUEIROZ BARROS
- 8611 - "Análise Não Linear de Pórticos Planos" - PAULO DE MATTOS PIMENTA

- 8612 - "Erros a Serem Evitados no Cálculo de Pórticos, em Particular no dos Edifícios" - JOSÉ CARLOS DE FIGUEIREDO FERRAZ
- 8613 - "Mínima Correctio Methodi Inveniendi Lineas Curvas Elastici" - PAULO DE MATTOS PIMENTA, CARLOS EDUARDO NIGRO MAZZILLI
- 8614 - "Nova Técnica para Codificações de Procedimentos Envolvendo Matrizes - Avaliação de Desempenho" - IVAN DE QUEIROZ BARROS
- 8615 - "Casos Especiais de Flambagem de Pórticos de Edifícios Altos" - JOSÉ CARLOS DE FIGUEIREDO FERRAZ
- 8616 - "Vigas Protendidas: Alterações das Tensões, das Deformações e dos Deslocamentos ao Longo do Tempo" - JOSÉ CARLOS DE FIGUEIREDO FERRAZ
- 8701 - "Consideração sobre Não-Linearidade Geométrica em Estruturas Reticuladas Planas" - CARLOS EDUARDO NIGRO MAZZILLI
- 8702 - "Consideração da Não-Linearidade Geométrica em Estruturas Laminares Planas" - Parte I - LUIZ ANTONIO CORTESE DIOGO
- 8703 - "Consideração da Não-Linearidade Geométrica em Estruturas Laminares Planas" - Parte II - LUIZ ANTONIO CORTESE DIOGO
- 8704 - "Estado Plano de Tensão (Método dos Resíduos Ponderados e Método dos Elementos Finitos)" - VICTOR M. DE SOUZA LIMA
- 8705 - "Aplicação das Equações de diferenças a um Caso Particular de Estrutura" - JOSÉ CARLOS DE FIGUEIREDO FERRAZ
- 8706 - "Verificação da Estabilidade dos Pilares de Pontes" - JOSÉ CARLOS DE FIGUEIREDO FERRAZ
- 8707 - "Aplicação do Método Variacional ao Cálculo do Empuxo sobre as Paredes de Arrimo" - JOSÉ CARLOS DE FIGUEIREDO FERRAZ
- 8708 - "Análise das Chapas em Regime Elasto - Plástico pelo Método dos Elementos Finitos" - LUIZ ANTONIO CORTESE DIOGO
- 8709 - "Análise das Placas em Regime Elasto-Plástico pelo Método dos Elementos Finitos" - LUIZ ANTONIO CORTESE DIOGO
- 8710 - "A Flambagem de Euler e a "Elástica" Revisitadas: Uma Formulação Unificada para os Cinco Casos Clássicos" - CARLOS EDUARDO NIGRO MAZZILLI
- 8711 - "Laje Protendida e Perdas de Protensão Resultantes da Retração, Fluência do Concreto e do Aço" - JOSÉ CARLOS DE FIGUEIREDO FERRAZ
- 8712 - "O Método dos Elementos Finitos na Solução de Placa, Solicitadas no seu Plano ou Fletidas. Vinculação com o Método de Ritz" - JOSÉ CARLOS DE FIGUEIREDO FERRAZ
- 8713 - "Sobre o Conceito de Corpo Material Linearmente Elástico" - PAULO BOULOS
- 8714 - "Rotações Finitas" - PAULO DE MATTOS PIMENTA
- 8715 - "Efeitos Estruturais de Segunda Ordem nas Trelças" - HENRIQUE DE BRITTO COSTA, YZUMI TAGUTI
- 8716 - "Estudo das Placas: Resíduos Ponderados e Elementos Finitos" - HENRIQUE DE BRITTO COSTA, VICTOR M. DE SOUZA LIMA
- 8717 - "Estacas com Diversos Vínculos de Extremidades Modelo de Winkler. Coeficiente de Reação Lateral do Solo com Distribuição Uniforme" - CARLOS ALBERTO SOARES

- 8718 - "Estacas com Diversos Vínculos de Extremidades - Modelo de Winkler. Coeficiente de Reação Lateral do Solo com Distribuição Triangular" - CARLOS ALBERTO SOARES
- 8719 - "Estacas com Diversos Vínculos de Extremidades - Modelo de Winkler. Coeficiente de Reação Lateral do Solo com Distribuição Trapezoidal" - CARLOS ALBERTO SOARES
- 8720 - "Sobre a Matriz de Rigidez Tangente das Barras de Treliças Planas Sujeitas a Rotações Grandes" - LUIZ ANTONIO CORTESE DIOGO
- 8721 - "Um Método Geral para a Redução da Matriz de Rigidez Tangente de Elementos Finitos" - PAULO DE MATTOS PIMENTA
- 8722 - "A Matriz de Rigidez Tangente do Elemento de Pórtico Plano - Teoria de Timoshenko" - PAULO DE MATTOS PIMENTA
- 8801 - "Distribuição Transversal de Carga nas Pontes de Vigas Justapostas" - JOSÉ CARLOS DE FIGUEIREDO FERRAZ
- 8802 - "O Método de Galerkin no Problema das Placas Fletidas - Teoria de Reissner" - HENRIQUE DE BRITTO COSTA
- 8803 - "Um Algoritmo para o Cálculo do Tensôor Rotação e do Tensôor das Deformações Logarítmicas em Problemas Incrementais" - PAULO DE MATTOS PIMENTA
- 8804 - "Um Algoritmo para a Integração das Tensões na Plasticidade Perfeita" - PAULO DE MATTOS PIMENTA
- 8805 - "Análise das Cascas Cilíndricas em Regime Elasto Plástico pelo Método dos Elementos Finitos" - LUIZ ANTONIO CORTESE DIOGO
- 8806 - "Consideração do Efeito de Membrana nas Placas pelo Método dos Elementos Finitos" - LUIZ ANTONIO CORTESE DIOGO
- 8807 - "Alteração do Estado de Tensão nas Estruturas Hiperestáticas Devida à Fluência do Aço, do Concreto e Retração" - JOSÉ CARLOS DE FIGUEIREDO FERRAZ
- 8808 - "O Método dos Mínimos Quadrados no Exame de alguns Casos de Instabilidade, Computada à Fluência do Material" - JOSÉ CARLOS DE FIGUEIREDO FERRAZ
- 8809 - "A Matriz de Rigidez Tangente do Elemento de Pórtico Espacial" - PAULO DE MATTOS PIMENTA
- 8810 - "Consideração da Fluência do Material da Determinação da Carga Crítica das Barras Mergulhadas em Meio Elástico" - JOSÉ CARLOS DE FIGUEIREDO FERRAZ
- 8811 - "Um Programa para Solução do Problema Generalizado de Autovalores e Autovetores para Matrizes Reais Densas" - PRISCILA GOLDENBERG, REYOLANDO M.L.R.F. BRASIL, MARCIA CIMERMANN
- 8812 - "Pilar de Pontes: Riscos dos Cálculos Correntes" - JOSÉ CARLOS DE FIGUEIREDO FERRAZ
- 8813 - "Sugestes à Norma, em Discussão, sobre Projeto de Estrutura de Concreto Protendido" - JOSÉ CARLOS DE FIGUEIREDO FERRAZ
- 8814 - " Esforços Resistentes do Concreto" - LAURO MODESTO DOS SANTOS
- 8815 - "Tabelas Momento - Curvatura" - LAURO MODESTO DOS SANTOS
- 8816 - "Análise Não-Linear de Arcos" - PAULO DE MATTOS PIMENTA
- 8817 - "Estados Limites das Unies Pregadas de Madeira" - PERICLES BRASILIENSE FUSCO, PEDRO AFONSO DE OLIVEIRA ALMEIDA

- 8818 - "O Emprego da Técnica de Aceleração da Convergência para a Resolução de Problemas Estruturais Através do Método dos Elementos Finitos por Algoritmo do Tipo Resíduo das Tensões" - FRANCISCO BRASILIENSE FUSCO JR., RUBENS AKEL
- 8819 - "Um Critério para o Estabelecimento dos Estimadores de Erro para os Elementos Finitos Adaptativos na Modalidade P" - FRANCISCO BRASILIENSE FUSCO JR. JARBAS A. GUEDES
- 8820 - "Non-Linear Finite-Element Formulation in Dynamic" - CARLOS EDUARDO NIGRO MAZZILLI
- 8821 - "Philosophiae Naturalis Principia Mathematica" de Newton: 300 Anos - JOSÉ CARLOS DE FIGUEIREDO FERRAZ
- 8822 - "A Estabilidade das Fundações Arenosas Estratificadas, Segundo V. V. Sokolovisky" - JOSÉ CARLOS DE FIGUEIREDO FERRAZ
- 8823 - "Flambagem de Estacas Totalmente Enterradas. Solo com Coeficiente de Reação Variável" - CARLOS ALBERTO SOARES
- 8824 - "As Equações de Vlasov e a Estabilidade Espacial das Barras de Seção Delgada" - JOSÉ CARLOS DE FIGUEIREDO FERRAZ
- 8825 - "Um Programa para Solução de Sistemas Lineares de Grande Porte - Aplicação à Engenharia de Estruturas" - PRISCILA GOLDENBERG, REYOLANDO M.L.R.F. BRASIL
- 8826 - "Sobre a Aceleração do Centro Instantâneo de Rotação" - NELSON ACHCAR, PAULO BOULOS
- 8827 - "Esforços Resistentes do Concreto" - LAURO MODESTO DOS SANTOS
- 8828 - "Tabelas Momento-Curvatura" - LAURO MODESTO DOS SANTOS
- 8901 - "A Estimativa da Coesão para o Cálculo da Estabilidade de Aterros e Fundações sobre Argilas Moles" - CARLOS DE SOUSA PINTO
- 8902 - "Trelças Espaciais de Madeira em Regime Viscoelástico sob Não-Linearidade Geométrica" - PAULO DE MATTOS PIMENTA, TAKASHI YOJO
- 8903 - "O Método dos Prismas Equivalentes Aplicado ao Cálculo das Variações de Tensão, ao Longo do Tempo, nas Seções de Concreto" - JOSÉ CARLOS DE FIGUEIREDO FERRAZ
- 8904 - "Efeitos de Laje Concretada Posteriormente sobre Viga Protendida" - JOSÉ CARLOS DE FIGUEIREDO FERRAZ, JOSÉ LOURENÇO BRAGA DE ALMEIDA CASTANHO
- 8905 - "O Cálculo das Grelhas de Pontes pelo Método de Courbon: Uma Hipótese por Demonstrar" - JOSÉ CARLOS DE FIGUEIREDO FERRAZ
- 8906 - "Erosão - Erosão em Área Urbana - Erosão Associada à Construção de Estradas Vicinais" - VERA MARY NINETA COZZOLINO
- 8907 - "Solos Tropicais - Proposta de Classificação Baseada nas Características de Compactação" - VERA MARY NINETA COZZOLINO
- 8908 - "Método Variacional de Cálculo de Construções Estaiadas sob Cargas Dinâmicas" - JOSÉ CARLOS DE FIGUEIREDO FERRAZ
- 8909 - "Métodos Aproximados de Determinação de Frequência de Vibração" - JOSÉ CARLOS DE FIGUEIREDO FERRAZ
- 8910 - "Non-Linear Analysis of Plane Framer I. Quasi-Static Analysis of Plane Framer with Initially Curved Members" - PAULO DE MATTOS PIMENTA

- 8911 - "Non-Linear Analysis of Plane Framers II. Dynamic Analysis of Plane Framers with Initially Curved Members" - PAULO DE MATTOS PIMENTA
- 8912 - "Derivation of Tangent Stiffness Matrices of Simple Finite Elements 1. Straight Bar Elements" - PAULO DE MATTOS PIMENTA
- 8913 - "A Stress Integration Algorithm for the Analysis of Elastic-Plastic Solids by the Finite Element Method I. Small Deformation Analysis" - PAULO DE MATTOS PIMENTA
- 8914 - "A Stress Integration Algorithm For the Analysis of Elastic-Plastic Solids by the Finite Elements Method II. Large Deformation Analysis" - PAULO DE MATTOS PIMENTA
- 8915 - "Flambagem de Estacas Parcialmente Enterradas Solo com Coeficiente de Recalque Constante" - CARLOS ALBERTO SOARES
- 8916 - "Caracterização da Deformabilidade na Elasticidade Linear" - PÉRICLES BRASILIENSE FUSCO
- 8917 - "Um Pacote de Subrotinas Matemáticas para o LMC" - PAULO DE MATTOS PIMENTA, PRISCILA GOLDENBERG
- 8918 - "Relatório de Subrotinas Matemáticas (I)" - PRISCILA GOLDENBERG, PAULO DE MATTOS PIMENTA
- 8919 - "Relatório de Subrotinas Matemáticas (II)" - PAULO DE MATTOS PIMENTA, PRISCILA GOLDENBERG
- 8920 - "Viga Contínua Mista Aço-Concreto, Conectada Elasticamente, sob a Aço da Fluência e Retração" - JOSÉ CARLOS DE FIGUEIREDO FERRAZ
- 8921 - "Relatórios de Subrotinas Matemáticas (III)" - PAULO DE MATTOS PIMENTA, PRISCILA GOLDENBERG
- 8922 - "O Problema da Flexão Plana na Teoria da Elasticidade dos Corpos Não Homogêneos" - JOSÉ CARLOS DE FIGUEIREDO FERRAZ
- 8923 - "Alterações das Tensões de Cisalhamento nas Peças de Concreto Protendido, devidas à Fluência e Retração" - JOSÉ CARLOS DE FIGUEIREDO FERRAZ
- 9001 - "Os Deslocamentos Devidos a Flexão das Vigas Protendidas" - JOSÉ CARLOS DE FIGUEIREDO FERRAZ
- 9002 - "Dinâmica das Estruturas Aporticadas Planas e Comportamento Geometricamente Não Linear" - REYOLANDO M. L. R. F. BRASIL, CARLOS E. N. MAZZILLI
- 9003 - "Teoria de Segunda Ordem das Placas - Estudo da Rigidez Secante" - HENRIQUE DE BRITTO COSTA, VICTOR M. DE SOUZA LIMA
- 9004 - "Influência das Tensões de Cisalhamento na Deformação da Viga sob o Regime Elasto-Plástico" - JOSÉ CARLOS DE FIGUEIREDO FERRAZ
- 9005 - "Ainda a Estabilidade dos Sistemas Elásticos. Aceno Histórico. O Erro de Euler" - JOSÉ CARLOS DE FIGUEIREDO FERRAZ
- 9006 - "A Origem das Funções de Bessel com algumas Aplicações em Problemas Estruturais" - AUGUSTO CARLOS DE VASCONCELOS
- 9007 - "Considerações sobre o Emprego do Teorema dos Trabalhos Virtuais na Resolução de Estruturas Hiperestáticas" - HENRIQUE DE BRITTO COSTA, LUIZ ANTONIO CORTESE DIOGO
- 9008 - "Non-linear Finite-element Formulation in Dynamics II" - CARLOS EDUARDO NIGRO MAZZILLI
- 9009 - "Fatores de Forma e Fatores de Carga Generalizados" - JOSÉ CARLOS DE FIGUEIREDO FERRAZ

- 9010 - "Corpos Hiperelásticos Homogêneos Transversalmente Isotrópicos No Ortotrópicos" - NELSON ACHCAR
- 9011 - "Análise das Cascas de Revolução em Regime Elasto Plástico pelo Método dos Elementos Finitos" - JOSÉ MARQUES FILHO, LUIZ ANTONIO CORTESE DIOGO
- 9012 - "O Algoritmo de Mínimo Grau para Reordenação e Solução de Sistemas Lineares Esparsos" - PRISCILA GOLDENBERG, REYOLANDO M. L. R. F. BRASIL, SÉRGIO PINHEIRO
- 9101 - "Consideração da Não-Linearidade Física e da Não-Linearidade Geométrica na Análise das Placas pelo Método dos Elementos Finitos - Parte 1" - LUIZ ANTONIO CORTESE DIOGO
- 9102 - "Introdução ao Estudo dos Pórticos Esbeltos - Matriz de Rigidez Secante" - HENRIQUE DE BRITTO COSTA, ALFONSO PAPPALARDO JR.
- 9103 - "Cálculo de Estruturas Sujeitas a Terremotos" - HENRIQUE DE BRITTO COSTA, SELMA H. SHIMURA
- 9104 - "Análise Não - Linear de Pórticos Espaciais - Parte I: Teoria e Método dos Elementos Finitos" - PAULO M. PIMENTA, TAKASHI YOJO
- 9105 - "Flambagem de Edifícios Altos" - JOSÉ CARLOS DE FIGUEIREDO FERRAZ
- 9106 - "Programas de Microcomputador para Análise Dinâmica de Estruturas nos Domínios do Tempo e da Frequência" - REYOLANDO M.L.R. DA F. BRASIL
- 9107 - "Variação nas Peças Protendidas" - JOSÉ CARLOS DE FIGUEIREDO FERRAZ
- 9108 - "Análise das Placas Sujeitas a Grandes Rotações Mediante o Uso do Método dos Elementos Finitos" - LUIZ ANTONIO CORTESE DIOGO
- 9109 - "Consideração Tópica sobre o Código Modelo 1990 do CEB-FIP" - JOSÉ CARLOS DE FIGUEIREDO FERRAZ
- 9110 - "Materiais Compatíveis com as Barras Cujas Secções Normais Permanecem Planas" - NELSON ACHCAR
- 9111 - "Dinâmica das Placas: Elementos Finitos via Resíduos Ponderados" - HENRIQUE DE BRITTO COSTA, FLAVIO JOSÉ GARZERI, REYOLANDO M. L. R. FONSECA BRASIL
- 9112 - "Estabilidade do Equilíbrio dos Sistemas no Campo Conservativo de Forças" - JOSÉ CARLOS DE FIGUEIREDO FERRAZ
- 9113 - "Sobre a Estabilidade Elástica de Arcos Abatidos" - REYOLANDO M. L. R. FONSECA BRASIL, VICTOR M. DE SOUZA LIMA
- 9114 - "Considerações Teóricas sobre o Adensamento Secundário" - HELOISA HELENA SILVA GONÇALVES
- 9115 - "Teoria de Vlassov sobre Barras, Placas e Cascas, de Parede Fina, Protendidas" - JOSÉ CARLOS DE FIGUEIREDO FERRAZ
- 9201 - "Consideração da Não-Linearidade Física e da Não-Linearidade Geométrica na Análise das Placas pelo Método dos Elementos Finitos - Parte II" - LUIZ ANTONIO CORTESE DIOGO
- 9202 - "Sobre a Interpretação de Provas de Carga em Estacas Considerando as Cargas Residuais de Ponta e a Reversão do Atrito Lateral" - FAIÇAL MASSAD
- 9203 - "Um Programa para Análise Limite de Pórticos Planos em Regime Elasto-Plástico" - REYOLANDO M.L.R. DA FONSECA BRASIL
- 9204 - "Equação Constitutiva das Barras Hiperelásticas Transversalmente Isotrópicas" - NELSON ACHCAR
- 9205 - "Análise Não-Linear de Pórticos Espaciais de Madeira" - PAULO DE MATTOS PIMENTA, TAKASHI YOJO

- 9206 - "Perda de Estabilidade à Tração" - JOSÉ CARLOS DE FIGUEIREDO FERRAZ
- 9207 - "Teoria de Segunda Ordem das Placas - Estudo da Rigidez Tangente" - HENRIQUE DE BRITTO COSTA, VICTOR M. DE SOUZA LIMA
- 9208 - "Vibrações Não-Lineares de Placas" - HENRIQUE DE BRITTO COSTA, REYOLANDO M. L. R. DA FONSECA BRASIL, PAULO SHIGUEME IDE
- 9209 - "Variedades Vinculadas Reduzidas" - PAULO BOULOS, NELSON ACHCAR,
- 9210 - "Estudo da Perda de Estabilidade Segundo Critérios Dinâmicos" - JOSÉ CARLOS DE FIGUEIREDO FERRAZ
- 9211 - "Programas de Microcomputador para Análise Dinâmica de Estruturas - Parte II - Vários Graus de Liberdade" - REYOLANDO M. L. R. DA FONSECA BRASIL
- 9212 - "Otimização da Deposição de Rejeitos" - LUIZ GUILHERME F. S. DE MELLO
- 9213 - "Andros - a Finite Element Program From Nonlinear Dynamics" - CARLOS EDUARDO NIGRO MAZZILLI, REYOLANDO M. L. R. DA FONSECA BRASIL
- 9214 - "Considerações sobre o Cálculo Dinâmico de Estruturas Usando Transformadas de Fourier" - ALFREDO PINTO DA CONCEIÇÃO NETO, VICTOR M. DE SOUZA LIMA
- 9215 - "Placas Delgadas" - ALFONSO PAPPALARDO JUNIOR, HENRIQUE DE BRITTO COSTA
- 9216 - "Excitação Paramétrica em Sistemas com um Grau de Liberdade" - MARIO EDUARDO SENATORE SOARES, CARLOS EDUARDO NIGRO MAZZILLI
- 9301 - "PEFMAT - Relatórios de Subrotinas Matemáticas - Parte IV" - PRISCILA GOLDENBERG, PAULO DE MATTOS PIMENTA, MARCIA CIMERMAN
- 9302 - "Vibrações de Pórticos com Vigas de Rigidez Infinita" - JOSÉ CARLOS DE FIGUEIREDO FERRAZ
- 9303 - "Direct Along - Wind Dynamic Analysis of Tall Structures" - MARIO FRANCO
- 9304 - "Comportamento Pós-Crítico de Barra Delgada Protendida" - JOSÉ CARLOS DE FIGUEIREDO FERRAZ
- 9305 - "Os Polinômios Trigonométricos na Solução de Problemas de Vibração Mecânica" - JOSÉ CARLOS DE FIGUEIREDO FERRAZ
- 9306 - "Linhas de Influência Dinâmicas para Deslocamentos, Momentos Fletores e Forças Cortantes nas Vigas Simples" - JOSÉ CARLOS DE FIGUEIREDO FERRAZ
- 9307 - "O Modelo Clam-Clay Revisto" - JOSÉ JORGE NADER
- 9308 - "Patologia da Concepção Estrutural: Danos por Efeitos de Segunda Ordem em Edifícios Altos, um Exemplo" - PÉRICLES BRASILIENSE FUSCO
- 9309 - "Vibração de Sistemas Não Lineares: Método de Aproximações Sucessivas" - JOSÉ CARLOS DE FIGUEIREDO FERRAZ
- 9310 - "Normalização dos Símbolos Gráficos para Projetos de Estruturas de Madeira" - PÉRICLES BRASILIENSE FUSCO
- 9311 - "Ensaio de Adensamento" - HELOISA HELENA SILVA GONÇALVES
- 9312 - "Comentários sobre a Normalização das Ações e Segurança nas Estruturas" - PÉRICLES BRASILIENSE FUSCO

- 9313 - "Introdução à Análise Dinâmica de Estruturas por Meio de Elementos Finitos - Parte I - Galerkin e Elementos Finitos" - HENRIQUE DE BRITTO COSTA, SELMA HISSAE SHIMURA
- 9314 - "Vibrações Aleatórias na Dinâmica de Estruturas" - REYOLANDO M. L. R. F. BRASIL
- 9315 - "Determinação da Equação para Cálculo do Momento Crítico à Flambagem Lateral" - VALDIR PIGNATTA E SILVA, LUIZ ANTONIO CORTESE DIOGO
- 9316 - "Efeito dos Sismos nas Estruturas Aporticadas" - JOSÉ CARLOS DE FIGUEIREDO FERRAZ
- 9317 - "As Estruturas Aporticadas com Vigas de Rigidez Infinita, Submetidas ao Sismo" - JOSÉ CARLOS DE FIGUEIREDO FERRAZ
- 9318 - "Uma Proposta de Normalização das Resistências da Madeira Estrutural" - PÉRICLES BRASILIENSE FUSCO
- 9319 - "Resistência dos Materiais Anisotrópicos" - PÉRICLES BRASILIENSE FUSCO
- 9401 - "Soluções Analíticas para a Deformação do Material Elasto - Plástico Cam - Clay úteis na Interpretação de Ensaios Triaxiais com Diferentes Trajetórias de Tensão" - JOSÉ JORGE NADER
- 9402 - "Introdução à Fotoelasticidade por Reflexão" - PEDRO AFONSO DE OLIVEIRA ALMEIDA, FRANCISCO ROURE FERNANDEZ, FREDERIC MARINON CARVAJAL
- 9403 - "Numerical Conditioning in Structural Solutions: a Proposal for a new Condition Number" - HENRIQUE LINDENBERG NETO
- 9404 - "A Esbeltez Estrutural e sua Influência nas Freqüências de Vibrações" - JOSÉ CARLOS DE FIGUEIREDO FERRAZ
- 9405 - "Determinação do Momento Crítico à Flambagem Lateral de Viabilizadas de Aço" - VALDIR PIGNATTA E SILVA, LUIZ ANTONIO CORTESE DIOGO
- 9406 - "Uma Análise dos Parâmetros de Ensaios Utilizados para Cálculo de Recalques por Adensamento" - HELOISA HELENA SILVA GONÇALVES
- 9407 - "Programação Matemática Aplicada à Análise Limite de Estruturas" I - PAULO DE MATTOS PIMENTA, PRISCILA GOLDENBERG, ERNESTO COUTINHO COLLA
- 9408 - "Programação Matemática Aplicada à Análise Limite de Estruturas II" - PAULO DE MATTOS PIMENTA, PRISCILA GOLDENBERG, ERNESTO COUTINHO COLLA
- 9409 - "Formulação de um Elemento Finito de Cabo Incorporando o Efeito do Atrito" - RUY M. PAULETTI, PAULO M. PIMENTA
- 9410 - "A Descrição do Domínio para o Projeto por Elementos Finitos" - JOSÉ ANTONIO LEROSA SIQUEIRA, JOO CYRO ANDRÉ
- 9411 - "O Método dos Elementos Finitos Aplicado a uma Formulação Mista da Teoria das Placas" - MYRIAM RENATA DIAS FERREIRA, HENRIQUE DE BRITTO COSTA
- 9412 - "Problemas Envolvendo Ponto, Reta e Plano, Tratados Vetorialmente" - JOSÉ CARLOS DE FIGUEIREDO FERRAZ
- 9413 - "Auto - Sincronização de Motores Não - Ideais Apoiados em Estruturas Elásticas" - PETRUS GORGONIO BULHES DA NBREGA, CARLOS EDUARDO NIGRO MAZZILLI
- 9501 - "Global and Local Instability of Concrete Tall Buildings" - M. FRANCO
- 9502 - "Um Elemento Finito Giroscópio" - MARCELO GONZALES BERGWELER, CARLOS EDUARDO NIGRO MAZZILLI

- 9503 - "Teoria da Segunda Ordem das Placas - Uma Formulação Mista" - SELMA HISSAE SHIMURA, HENRIQUE DE BRITTO COSTA
- 9504 - "Modelagem de Corpos Sólidos: Topologia e Operadores de Euler" - BENEDITO ROQUE DE GUIMARÃES ARANTES JUNIOR, JOÃO CYRO ANDRÉ, JOSÉ ANTONIO LEROSA DE SIQUEIRA
- 9505 - "Investigação Experimental em Laje de Concreto Armado Apoiada em Vigas Flexíveis" - ANTONIO RUBENS PORTUGAL MAZZILLI
- 9506 - "Influência da Flexibilidade das Vigas e das Lajes nos Esforços das Estruturas de Concreto Armado" - ANTONIO RUBENS PORTUGAL MAZZILLI
- 9507 - "A Calibração da Segurança na Nova Norma de Projeto de Estruturas de Madeira" - PÉRICLES BRASILIENSE FUSCO
- 9508 - "Método de Ensaio de Punção Excêntrica em Placa de Concreto" - FÁBIO ARMANDO BOTELHO CORDOVIL, PÉRICLES BRASILIENSE FUSCO
- 9509 - "Ensaio de Placas de Concreto Armado - Punção Excêntrica" - FÁBIO ARMANDO BOTELHO CORDOVIL, PÉRICLES BRASILIENSE FUSCO
- 9510 - "Armadura de Cisalhamento para Punção em Placas de Concreto" - FÁBIO ARMANDO BOTELHO CORDOVIL, PÉRICLES BRASILIENSE FUSCO
- 9511 - "Aspectos Normativos sobre Punção em Placas de Concreto Armado" - FÁBIO ARMANDO BOTELHO CORDOVIL, PÉRICLES BRASILIENSE FUSCO
- 9512 - "Alternativas de Representação da Protensão, no Projeto de Estruturas de Concreto" - KALIL J. SKAF, FERNADO R. STUCCHI
- 9513 - "Aplicações do Lagrangeano Aumentado em Otimização Estrutural" - PAULO DE MATTOS PIMENTA, PRISCILA GOLDENBERG, REYOLANDO BRASIL
- 9514 - "Análise Linear da Estabilidade de Trelças Utilizando o Método de Lanczos" - CÉLIA REGINA MORETTI MEIRELLES, PAULO DE MATTOS PIMENTA
- 9515 - "Análise Dinâmica de Pórticos Planos sob Ação de Carregamentos Transientes Considerando Formação de Rótulas Plásticas" - REYOLANDO M. L. R. F. BRASIL, CESAR FERNANDES JUNIOR

