

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

Autarquia associada à Universidade de São Paulo

PESQUISA COOPERATIVA: O PROJETO DE DESENVOLVIMENTO DE FIBRAS DE CARBONO PARA APLICAÇÃO EM ULTRACENTRÍFUGAS

PAULO CÉSAR BELTRÃO DE QUEIROZ

**Dissertação apresentada como
parte dos requisitos para a
obtenção do Grau de Mestre em
Ciências na Área de Tecnologia
Nuclear – Aplicações**

**Orientador:
Profa. Dra. Désirée Moraes Zouain**

SÃO PAULO

2008

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

Autarquia associada à Universidade de São Paulo

PESQUISA COOPERATIVA: O PROJETO DE DESENVOLVIMENTO DE FIBRAS DE CARBONO PARA APLICAÇÃO EM ULTRACENTRÍFUGAS

PAULO CÉSAR BELTRÃO DE QUEIROZ

**Dissertação apresentada como
parte dos requisitos para a
obtenção do Grau de Mestre em
Ciências na Área de Tecnologia
Nuclear – Aplicações**

**Orientador:
Profa. Dra. Désirée Moraes Zouain**

SÃO PAULO

2008

DEDICATÓRIA

A meus queridos pais, Paulo e Flora, pelo carinho e atenção,

A meus carinhosos filhos, Benjamin e André, pela alegria e ternura,

A minha amada esposa, Debora, pela dedicação, amor e felicidade.

AGRADECIMENTOS

Meus agradecimentos especiais à Prof^a. Dr^a. Désirée Moraes Zouain por ter gentilmente aceitado orientar-me neste mestrado. Sua orientação segura e sábia serviu de bússola a este humilde e agradecido aprendiz;

Aos colegas de mestrado, professores de disciplinas, pessoal de apoio da CPG e demais funcionários do IPEN, minha gratidão por todo o apoio e pelo trabalho de excelência que desenvolvem. Especial reconhecimento à Biblioteca do IPEN, a quem homenageio na pessoa da funcionária Maria Eneide de Souza Araújo, sempre atenciosa, prestativa e competente;

Ao Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo (CTMSP), seus colaboradores e profissionais que há três décadas produzem abnegadamente conhecimento de ponta na área nuclear, meu reconhecimento pelo trabalho realizado, por seu apoio a esta pesquisa e minha concordância com seu lema: realmente, “Tecnologia própria é independência”;

Aos engenheiros Eric Olifiers e Daniel Kersting, competentes e dedicados gerentes do Projeto de Fibra de Carbono do CTMSP, minha gratidão pelas inúmeras explicações técnicas sobre o assunto, as quais muito me ajudaram.

Ao Capitão-de-Fragata (EN) André Luiz Ferreira Marques, coordenador de projetos do CTMSP, meus sinceros agradecimentos pela orientação técnica, pelo exemplo profissional e pela confiança transmitidos em nosso relacionamento pessoal e profissional.

EPÍGRAFE

“Daqui a alguns anos estarás mais arrependido pelas coisas que não fez do que pelas que fez. Solte as amarras! Afastese do porto seguro! Agarre o vento em suas velas! Explore! Sonhe! Descubra!”

Mark Twain, pseudônimo de Samuel Langhorne Clemens (1835-1910), escritor e dramaturgo americano.

PESQUISA COOPERATIVA: O PROJETO DE DESENVOLVIMENTO DE FIBRAS DE CARBONO PARA APLICAÇÃO EM ULTRACENTRÍFUGAS

Paulo César Beltrão de Queiroz

RESUMO

Em um cenário nacional de grandes dificuldades orçamentárias, soluções criativas que conjuguem os esforços de instituições em prol de uma finalidade comum são sempre desejáveis. Neste trabalho, analisa-se o desenvolvimento de fibras de carbono de alto desempenho para aplicação em ultracentrífugas nucleares e o projeto de Pesquisa Cooperativa que o viabilizou. A fibra de carbono com as características necessárias a empreendimentos desse tipo é um insumo de grande complexidade tecnológica. A produção é concentrada em alguns poucos produtores mundiais e seu comércio é alvo de restrições e salvaguardas internacionais. Não há produção no Brasil. É considerada material de uso dual, ou seja, pode ter tanto aplicações exclusivamente civis, como militares. A Marinha do Brasil utiliza essa fibra na fabricação de ultracentrífugas nucleares, nas quais materiais que conjuguem leveza, rigidez e resistência de alto nível são extremamente desejáveis, pois aumentam a eficiência na separação isotópica. Sua fibra de carbono, importada, é baseada na poliacrilonitrila (PAN), comercialmente mais difundida, mais barata e utilizada em aplicações similares. A necessidade de desenvolvimento nacional é decorrente de dificuldades em sua aquisição. Para tanto, foi organizada uma parceria de pesquisa entre o Centro Tecnológico da Marinha (CTMSP), a UNICAMP, a USP e a empresa RADICIFIBRAS, com apoio financeiro de uma agência governamental (FINEP), para a produção nacional de fibra de carbono baseada na PAN. A pesquisa realizada identificou as práticas de sucesso alcançadas, bem como os referenciais teóricos de Projetos de Pesquisa Cooperativa.

COOPERATIVE RESEARCH: THE CARBON FIBER DEVELOPMENT FOR URANIUM CENTRIFUGES PROJECT

Paulo César Beltrão de Queiroz

ABSTRACT

This research analyzes both the carbon fiber-based development for uranium centrifuges and the research project that supports its development effort over time. The carbon fiber-based engineering properties make it a valuable supply for high technologic products. Nevertheless, its **fabrication occurs** only in few developed countries and there is no production in Brazil. In addition, the carbon fiber-based products have dual applications: they can be used by the civilian and military industry. Therefore, there are international restrictions related to its use and applications that justify the internal development. Moreover, the Brazilian Navy centrifuges for uranium enrichment were developed using carbon-fiber which contains polyacrylonitrile (PAN) as an imported raw material. The PAN properties of low weight, high tensile strength increase the isotopic separation efficiency. The Brazilian financial scenario surrounded by the international uncertain economy shows that combined creative project solutions are more effective. Therefore, the *Navy's Technological Center in Sao Paulo (CTMSP)*, the *University of Campinas (UNICAMP)*, the *University of São Paulo (USP)*, the *RADICIFIBRAS* company, and the Brazilian *FINEP* agency, which is responsible for the project financial support, **established a partnership** aiming the development of a domestic PAN-based carbon fiber industry. The innovative project solutions adopted and the results of this partnership are presented here.

SUMÁRIO

Página

CAPA	i
PÁGINA DE ROSTO	ii
DEDICATÓRIA	iii
AGRADECIMENTOS	iv
EPÍGRAFE	v
RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
SUMÁRIO	viii
LISTA DE TABELAS	x
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE ABREVIATURAS E/OU SIGLAS	xii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Razões principais que levaram o autor a realizar a pesquisa.....	1
1.2 Importância do problema levantado	2
1.3 Informações sobre o alcance da pesquisa e delimitação do assunto	2
1.4 Fundamentos teóricos.....	2
1.5 Relação do trabalho com outros similares	3
2. OBJETIVOS	4
3. REVISÃO DA LITERATURA	5
3.1 Fibra de carbono de características especiais	5
3.2 Situação do mercado de fibra de carbono.....	14
3.2.1 Principais produtores.....	15
3.2.1.1 Produção de fibra de carbono na América do Norte	16
3.2.1.2 Produção de fibra de carbono na Europa.....	20
3.2.1.3 Produção de fibra de carbono na Ásia	22
3.2.1.4 Produção de fibra de carbono no Brasil	23
3.3 Restrições de mercado	26

3.4	Pesquisa Cooperativa	28
4.	METODOLOGIA	37
5.	RESULTADOS.....	42
6.	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	71
7.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	77
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	81
	BIBLIOGRAFIA RECOMENDADA.....	85

LISTA DE TABELAS

	Página
TABELA 1 – Propriedades típicas de materiais estruturais comuns	9
TABELA 2 – Custo de fibras de carbono	10
TABELA 3 – Utilização de fibras de carbono em Sistemas Aeroespaciais	17
TABELA 4 – Capacidade nominal de produção de fibra de carbono PAN (ton.) ..	18
TABELA 5 – Produtores de fibra de carbono PAN nos EUA (DFARS)	19
TABELA 6 – Produtores de fibra de carbono PAN nos EUA (não DFARS)	20
TABELA 7 – Propriedades da Fibra de Referência	55
TABELA 8 – Comparação das melhores fibras desenvolvidas	59
TABELA 9 – Desembolso de recursos (cronograma previsto e efetivado)	60
TABELA 10 – Marco Lógico do projeto de pesquisa cooperativa do CTMSP	63

LISTA DE FIGURAS**Página**

FIGURA 1 – Tipos de fibra de carbono conforme suas performances mecânicas	11
FIGURA 2 – Processo de obtenção da fibra de carbono e da fibra precursora	12
FIGURA 3 – Diagrama de ações do projeto de pesquisa cooperativa	54

LISTA DE ABREVIATURAS E/OU SIGLAS

ABRAFAS - Associação Brasileira dos Produtores de Fibras Acrílicas e Sintéticas;

AIEA - Agência Internacional de Energia Atômica (Áustria), o mesmo que IAEA;

BID - Banco Interamericano de Desenvolvimento;

CADRA - *Cooperative Research and Development Agreements*;

CTMSP - Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo;

CNPq - Conselho Nacional de desenvolvimento Científico e Tecnológico;

DFARS - *Defense Federal Acquisition Regulation Supplement*;

DoD - Departamento de Defesa dos EUA;

FIG. - Figura;

FINEP - Financiadora de Estudos e Projetos;

FNDCT - Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico;

GTZ - **Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit GmbH, empresa de** Cooperação Técnica Alemã;

IAEA - *International Atomic Energy Agency* (Áustria);

ICT - Instituição de Ciência e Tecnologia;

IF - USP - Instituto de Física da Universidade de São Paulo;

INB - Indústrias Nucleares do Brasil S.A.;

INFCIRC - *Information Circular*, documento produzido pela IAEA;

IPEN - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares;

IQ - UNICAMP - Instituto de Química da Universidade de Campinas;

JCMA - *Japan Carbon Fiber Manufacturers Association*;

MB - Marinha do Brasil;

MCT - Ministério de Ciência e Tecnologia;

Ksi - *Thousands of pounds per square inch*;

Msi - *Millions of pounds per square inch*;

MPP - Matriz de Planejamento de Projetos;

NSG - *Nuclear Suppliers Group*;

PAN - Poliacrilonitrila;

P&D - Pesquisa e Desenvolvimento;

P&D&I - Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação;

PME - Pequenas e médias empresas;

RJV - *Research Joint Venture*;

SBPC - Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência;

SIAFI - Sistema Integrado de Administração Financeira, do governo federal;

TAB. - Tabela;

TNP - Tratado de Não-Proliferação Nuclear.

1. INTRODUÇÃO

1.1 Razões principais que levaram o autor a realizar a pesquisa

Em um cenário nacional de grandes dificuldades orçamentárias, projetos que consigam conjugar recursos materiais e humanos dispersos são sempre necessários e desejáveis em qualquer organização.

A pesquisa cooperativa caracteriza-se por ser uma forma compartilhada de desenvolvimento de tecnologia em que instituições e empresas atuam de forma cooperada a fim de resolver um problema tecnológico ou produzir uma inovação. Suas características de redução de custos e conjugação de esforços materiais e intelectuais a tornaram um dos principais instrumentos de desenvolvimento e difusão tecnológica nos países desenvolvidos (MINISTÉRIO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA, 2005).

Este aluno, por trabalhar como gestor público, pode acompanhar de perto as dificuldades financeiras que vem sendo enfrentadas nos últimos anos pelo Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo (CTMSP). O Comando da Marinha, vinculado ao Ministério da Defesa, tem incentivado suas unidades a buscarem parcerias a fim de minimizarem os dispêndios de recursos orçamentários já escassos.

Nesse cenário, surgiu o projeto de desenvolvimento de fibra de carbono para aplicação nas ultracentrífugas. Tal projeto, de natureza complexa e de caráter dispendioso, foi organizado de modo a conjugar esforços de diferentes instituições em prol de um avanço tecnológico necessário, reunindo o conhecimento sobre o assunto e otimizando custos.

O tema abordado no presente trabalho foi escolhido com base na observação das possíveis vantagens que esse arranjo de pesquisa cooperativa pode trazer às instituições de pesquisa e desenvolvimento tecnológico nacionais.

O tema deste trabalho está relacionado à linha de pesquisa à qual este aluno está vinculado no Programa de Pós-Graduação do IPEN – Tecnologia Nuclear, Aplicações, bem como à linha de pesquisa de sua orientadora – Gestão de Tecnologia, Inovação e Sistemas de Qualidade.

O tema escolhido é atual, pouco explorado na literatura nacional e de grande aplicação em países industrializados. É relevante, pois a experiência adquirida em países desenvolvidos (Japão, Estados Unidos, Coréia, entre outros) com esse tipo de arranjo cooperativo pode servir de exemplo e inspiração para a área de pesquisa e desenvolvimento nacional.

1.2 A importância do problema levantado

A importância do problema levantado está em possibilitar aos profissionais envolvidos com pesquisa, desenvolvimento e inovação conhecer uma forma de arranjo compartilhado de pesquisa em que a conjugação de esforços de diferentes entes leva à realização de inovações e à superação de impasses tecnológicos.

1.3 Informações sobre o alcance da pesquisa e delimitação do assunto

Este trabalho objetiva trazer contribuições relevantes aos profissionais e pesquisadores que atuam em organizações de pesquisa e desenvolvimento, universidades, empresas e agências governamentais de fomento.

O presente trabalho descreve o processo tecnológico de obtenção de fibra, analisa criticamente o mercado de fibra de carbono no país e exterior e busca identificar os fatores críticos de sucesso para um projeto de pesquisa cooperativa, focalizando, para análise, a experiência do CTMSP no projeto de pesquisa cooperativa para o desenvolvimento de fibra de carbono de características especiais.

1.4 Fundamentos teóricos

Este trabalho, quanto a seus referenciais teóricos, foi dividido em três partes: obtenção da fibra de carbono para aplicação em ultracentrífugas, restrições do mercado de fibra e caracterização da pesquisa cooperativa.

Para a descrição do processo de obtenção da fibra de carbono foram essenciais as seguintes publicações:

- *High-Performance Structural Fibers for Advanced Polymer Matrix Composites* (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2005);

- *Polyacrylonitrile (PAN) Carbon Fibers Industrial Capability Assessment* (DEPARTMENT OF DEFENSE, 2005);
- *Composite Materials Handbook. Polymer matrix composites: material properties* (DEPARTMENT OF DEFENSE, 2002);
- *High Performance Synthetic Fibers for Composites* (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 1992);
- *Assessing industrial capabilities for carbon fiber production* (TRACESKI, 1999).

Quanto às restrições impostas ao comércio de fibras de carbono de características especiais:

- *Information Circular. INFCIRC/254/Rev7/Part1* (IAEA, 2005);
- *Model Protocol Additional to the Agreement between States and the International Atomic Energy Agency for the Application of Safeguards* (IAEA, 1997);
- *The Wassenaar Arrangement on export controls for conventional arms and dual-use goods and technologies* (WASSENAAR ARRANGEMENT, 2005).

Para a caracterização da pesquisa cooperativa, tema ainda pouco abordado na literatura nacional, foram de grande relevância os seguintes trabalhos:

- Programa de apoio à capacitação tecnológica da indústria: Pesquisa Cooperativa (MCT, 2005);
- *Knowledge sharing in cooperative research and development* (SAKAKIBARA, 1998);
- *Why firms form research joint ventures: theory and evidence* (ROLLER *et al*, 1997);
- *An Analysis of Cooperative Research and Development* (KATZ, 1986).

1.5 Relação do trabalho com outros similares

Dadas as características do assunto, sendo o tema pouco estudado no país, a pesquisa desenvolvida se assemelha à descrita por Gil (2007) como sendo de caráter exploratório, não tendo sido encontrada correlação com outros trabalhos.

2. OBJETIVOS

O projeto de pesquisa cooperativa para o desenvolvimento de fibra de carbono constitui-se em experiência inovadora e promissora no âmbito da Administração Pública, ao conjugar formalmente, em prol de um objetivo comum, esforços da iniciativa privada, comunidade acadêmica e instituições de pesquisa. Justifica-se, assim, a necessidade de um maior aprofundamento sobre o tema objetivando caracterizá-lo e compreendê-lo.

A presente dissertação tem os seguintes objetivos:

- Estudar o processo tecnológico e de inovação na obtenção de fibra de carbono;
- Estudar e analisar criticamente o mercado de fibra de carbono no país e no exterior;
- Identificar os fatores críticos de sucesso para um projeto de pesquisa cooperativa, focalizando a experiência do CTMSP no Projeto de Pesquisa Cooperativa para o desenvolvimento de fibra de carbono para a utilização em ultracentrifugas;

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Fibra de carbono de características especiais

A fibra de carbono é um filamento longo e fino de aproximadamente 0,005-0,010 mm em diâmetro composta em grande parte por átomos de carbono.

Atribui-se a descoberta de sua existência a Thomas Edson que, em 1879, patenteou o processo de manufatura de filamentos de carbono adequados ao uso em lâmpadas elétricas.

Os átomos de carbono estão agrupados em cristais microscópicos que permanecem relativamente alinhados paralelamente ao longo do eixo da fibra. Esse alinhamento dos cristais permite que a fibra tenha uma resistência extraordinária.

As fibras de carbono são produzidas pela pirólise de fibras orgânicas precursoras, como o piche do petróleo, o raion e a poliacrilonitrila (PAN) em uma atmosfera inerte. São normalmente confundidas com grafite; entretanto, fibras de carbono e fibras de grafite diferem, basicamente, quanto à temperatura em que as fibras são feitas, ao tipo de tratamento térmico e à quantidade de carbono produzido.

Fibras de carbono são obtidas a partir de carbonização, à temperatura de cerca de 1300°C, contendo em torno de 93-95% de carbono, enquanto que as fibras de grafite “grafitam-se” a uma temperatura que varia de 1900 a 3000°C e contém mais de 99% de carbono (DEPARTMENT OF DEFENSE, 2002).

Fibras de carbono são materiais de alta resistência mecânica e rigidez que, combinados a uma matriz, normalmente um plástico epóxi, formam um material compósito avançado. É a combinação de alta resistência e rigidez, conjugada a uma baixa densidade e boa resistência à corrosão, que faz com que os compósitos de fibra de carbono sejam tão atraentes no mercado internacional, sendo caracterizados, inclusive, como tecnologia militar crítica (TRACESKI, 1999).

As fibras carbônicas produzem filamentos de alta resistência mecânica usados para os mais diversos fins, destacando-se as aplicações nos setores têxteis, automotivos, esportivos, aeroespaciais e de defesa. A pirólise consiste em um método de produção de fibras de carbono em que há decomposição pelo calor de

material rico em carbono. Este material retém sua forma fibrosa através de tratamentos térmicos que resultam em carbonização com alto resíduo carbonáceo.

O National Research Council (2005) classifica a fibra de carbono como uma das fibras de alto desempenho mais importantes para aplicações militares e aeroespaciais. Por fibras de alto desempenho, entendem-se aquelas projetadas para usos específicos que requerem rigidez, resistências química, térmica e à tensão excepcionais.

A fibra de vidro é a fibra de alto desempenho mais antiga, sendo manufaturada desde a década de 1930. Atualmente, a fibra de vidro é utilizada, por exemplo, na indústria náutica e há poucos anos revolucionou a indústria de comunicações com a fibra ótica.

A fibra de carbono teve um desenvolvimento posterior à fibra de vidro, o qual ocorreu na década de 1950 quando se reconheceu que materiais que combinassem leveza, alta resistência e rigidez seriam necessários à produção de estruturas de características especiais quanto ao peso e resistência (FITZER *et al*). A produção de fibras de carbono veio suprir essa necessidade.

Essa produção ocorre a partir do processamento em alta temperatura de um dos três tipos de fibras precursoras: **PAN, piche e raion**. Dependendo do tipo de precursor e do processo utilizado, a fibra de carbono obtida possui microestrutura e propriedades diferentes.

Tipicamente, as fibras baseadas na PAN têm uma resistência específica maior e um módulo específico menor do que as fibras feitas a partir do piche e do raion¹. Fibras baseadas no piche têm, por sua vez, menor resistividade elétrica e maior condutividade térmica. Quanto ao aspecto econômico, as fibras de carbono baseadas na PAN são mais baratas do que as obtidas a partir dos outros dois tipos de precursores (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2005).

As fibras precursoras são matérias-primas necessárias para a produção de fibras de carbono de qualidade. São polímeros orgânicos caracterizados por longas cadeias de moléculas unidas por átomos de carbono que, mediante

¹ A resistência específica e o módulo específico caracterizam o limite de resistência à tração em relação à densidade relativa e o módulo de elasticidade em relação à densidade relativa.

processos de tratamento térmico e condições controladas de tensão, atmosfera, tempo e, principalmente, temperatura, podem originar fibras de carbono de alto desempenho (*high performance carbon fibers*).

A exata composição de cada precursor (PAN, piche e raion) varia de uma empresa para outra e é considerada um segredo comercial.

A PAN é considerada uma das mais importantes fibras precursoras para a obtenção da fibra de carbono. Cerca de 90% de todas as fibras de carbono comerciais produzidas no mundo são obtidas a partir da conversão térmica de fibras precursoras de PAN. Ela tem uma microestrutura diferenciada que lhe confere uma resistência maior à tensão (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2005).

Em geral, as fibras de carbono baseadas na PAN dominam aplicações em que a resistência é um fator crítico preponderante, como no caso do rotor de uma ultracentrífuga, o qual precisa conjugar leveza e resistência em grandes velocidades.

A URENCO, uma das grandes corporações mundiais na área nuclear, atribui como fator chave para o sucesso das modificações incrementais em suas centrífugas (seis gerações), especialmente em seu comprimento e na velocidade do rotor, ao desenvolvimento de tecnologia de fibras de alta qualidade (UPSON, 2001). Nesse sentido, trabalho recente (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2005) indica que a desordem inter e intracristalina, características das fibras baseadas na PAN, são responsáveis pela resistência superior à tensão e compressão.

As fibras de carbono baseadas em precursores a partir do piche respondem por cerca de 9% do mercado de fibras de carbono no mundo. São processos energo-intensivos (requerem temperaturas elevadas) e, por isso, mais caros. Elas possuem uma resistência menor por conta do alto grau de grafitação em sua microestrutura (estrutura grafitica).

Entretanto, possuem uma condutividade térmica que chega a ser cem vezes maior do que a da fibra baseada na PAN e três vezes a do cobre, o que justifica que sejam utilizadas em aplicações em que a transferência de calor e a rigidez sejam fatores mais relevantes ou críticos como, por exemplo, aeronaves militares e estruturas de satélites espaciais.

O raion, embora tenha sido na década de 1960 e início da década de 1970 a matéria-prima predominante para a produção das primeiras fibras de carbono de alto desempenho, responde atualmente por menos de 1% do comércio de fibras de carbono no mundo. Isto se deu devido a seus elevados custos, suas limitadas propriedades físicas e seu baixo rendimento em carbono (20-30%).

Nos últimos anos, ganhos incrementais significativos foram obtidos nas propriedades mecânicas das duas principais fibras precursoras de carbono, embora avanços revolucionários em ambas as tecnologias não tenham sido obtidos, em parte por conta de reestruturações nesse mercado e redução de investimentos em pesquisa, principalmente, do Departamento de Defesa americano (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2005).

As fibras de carbono têm sua utilização principal conjugada a outros polímeros, como, por exemplo, resinas epóxi. Os materiais reforçados, resultantes da conjugação de características da fibra de carbono a outros polímeros, são chamados de compósitos por serem feitos de mais de um material (DEPARTMENT OF DEFENSE, 2002).

Os compósitos reforçados de fibra de carbono possuem uma resistência maior que a do aço, por exemplo, mas são significativamente mais leves (TAB. 1), o que explica sua importância tecnológica e econômica e os faz serem utilizados em substituição a peças metálicas em empreendimentos diversos, que vão da produção aeroespacial a itens esportivos, como raquetes de tênis.

Na Tab. 1, a seguir, é apresentada uma comparação de propriedades mecânicas típicas de materiais estruturais comuns em relação a compósitos de fibra de carbono. A resistência deve ser entendida como a capacidade de um material resistir à tensão sem ruptura e a rigidez é a propriedade de resistir à deformação elástica.

TABELA 1 – Propriedades típicas de materiais estruturais comuns

Material	Resistência (ksi) ^a	Rigidez (Msi) ^b	Densidade (g/cm ³)
Metais			
Alumínio	80 (551,6 MPa)	10 (69 GPa)	2.76
Titânio	160 (1103,2 MPa)	16 (110,3 GPa)	4.42
Aço	200 (1379 MPa)	30 (206,8 GPa)	8.00
Compósitos			
Vidro/epóxi	250 (1723,7 MPa)	8 (55,2 GPa)	1.99
Aramida (Kevlar)/epóxi	190 (1310 MPa)	12 (82,7 GPa)	1.38
Carbono (Grafite)/epóxi	215 (1482,4 MPa)	21 (144,8 GPa)	1.55

^a *Thousands of pounds per square inch.*
^b *Millions of pounds per square inch.*
1 psi=6,895 MPa

Fonte: adaptado de ASM International (1987), *apud* Traceski (1999)

A fibra de carbono representa a fibra dominante na indústria de compósitos avançados, sendo usada em mercados industrial, de recreação e aeroespacial (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 1992).

As fibras de carbono também são caracterizadas pelo seu módulo de tensão (*tensile modulus*), o qual representa a medida que indica quanta força um certo diâmetro de fibra pode sofrer sem quebrar. A unidade inglesa dessa medida é libra de força por polegada quadrada, ou *pounds of force per square inch*, cuja sigla é o psi.

As fibras que possuem um módulo de tensão baixo (*low modulus*) tem menos de 34,8 milhões psi (ou 240 milhões de kPa). Essa classificação de fibras quanto à sua tensão possui uma escala ascendente que vai do padrão (*standard modulus*), passa pelo intermediário (*intermediate modulus*) até os módulos mais altos (*high e ultrahigh*).

Para exemplificar, as fibras de carbono com um módulo muito alto tem um módulo de tensão de 72,5 a 145,0 psi (500 milhões a 1 bilhão de kPa) e requerem uma capacidade tecnológica muito grande para sua obtenção, sendo, por conseguinte, mais caras, conforme verifica-se na TAB.2:

TABELA 2 – Custo de fibras de carbono

	Módulo de tensão (Msi)	Custo (US\$/lb)
<i>Low Elastic Modulus</i>	Abaixo de 33	~5
<i>Standard modulus</i>	33-35	18-20
<i>Intermediate modulus</i>	40-50	31-33
<i>High modulus</i>	50-70	60-65
<i>Ultrahigh modulus</i>	70-140	120-900

Fonte: adaptado de Traceski (1999)

O módulo de tensão de fibra, no sistema internacional, é indicado pelo Pascal (Pa). A fibra de carbono é classificada segundo seu módulo de tensão e resistência, conforme a seguir²:

- *Ultra high elastic modulus:*
 - Módulo de tensão - 600 GPa ou maior;
 - Resistência à tensão – 2,5 GPa ou maior.
- *High elastic modulus:*
 - Módulo de tensão – 350 a 600 GPa;
 - Resistência à tensão – 2,5 GPa ou maior.
- *Intermediate elastic modulus:*
 - Módulo de tensão – 280 a 350 GPa;
 - Resistência à tensão – 3,5 GPa ou maior.
- *Standard elastic modulus:*
 - Módulo de tensão – 200 a 280 GPa;
 - Resistência à tensão – 2,5 GPa ou maior.
- *Low elastic modulus:*
 - Módulo de tensão - 200 GPa ou menor;
 - Resistência à tensão – 3,5 GPa ou menor.

² Conforme a *Japan Carbon Manufacturers Association*, associação que congrega os produtores de fibra de carbono no Japão. Disponível em: <[http:// www.carbonfiber.gr.jp/english/index.html](http://www.carbonfiber.gr.jp/english/index.html)>. Acesso em 16 mai.2008.

Na FIG.1 são apresentados os tipos de fibras de carbono, em termos de resistência e módulo (em GPa):

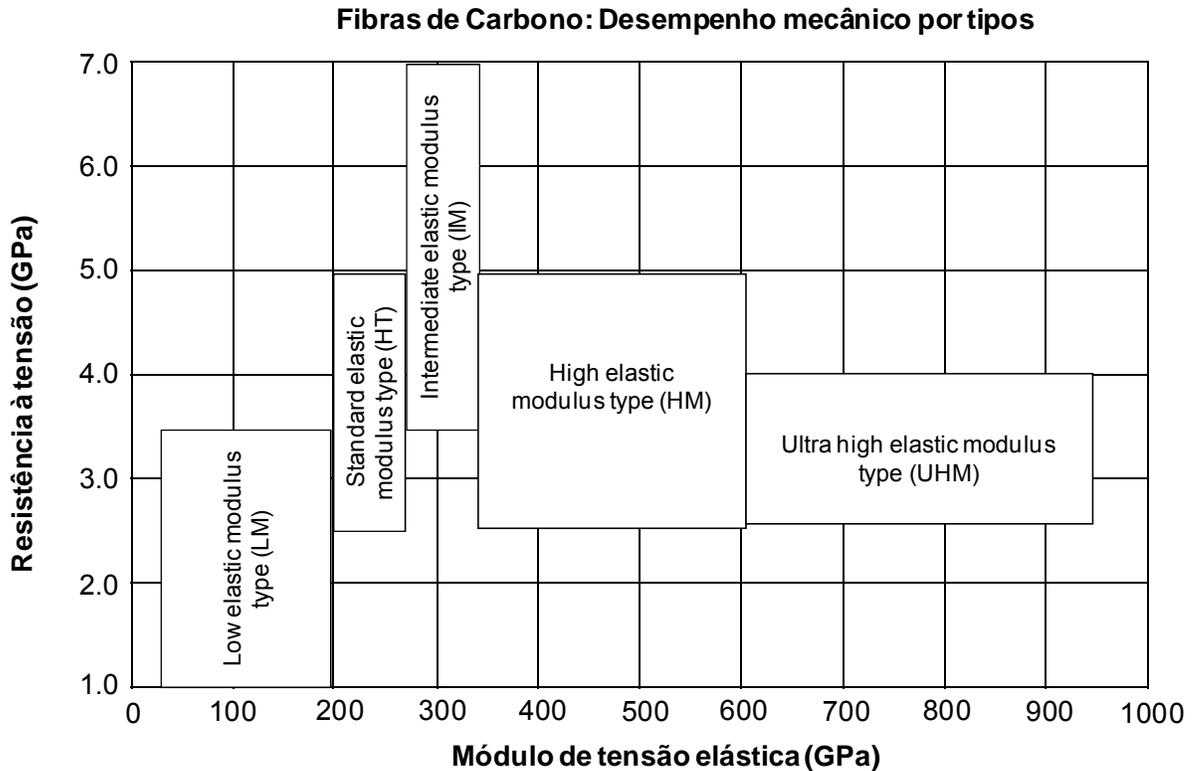


FIGURA 1: Tipos de fibra de carbono conforme seus desempenhos mecânicos

Fonte: adaptado de Japan Carbon Manufacturers Association. Disponível em: <<http://www.carbonfiber.gr.jp/english/index.html>>. Acesso em 16 mai.2008.

Quanto a uma descrição técnica do processo de obtenção da fibra de carbono a partir da PAN, sucintamente pode-se afirmar que se inicia com a polimerização (e posterior fiação por via úmida do polímero acrílico, com a utilização de solventes), passa-se pela estabilização da fibra precursora (com o aquecimento da fibra a temperaturas que variam de 200 a 300°C) e chega-se à carbonização (aquecimento a temperaturas superiores a 1200°C em atmosfera inerte), ou mesmo à grafitação (tratamento a calor em que as temperaturas podem atingir 3000°C), caso queira-se atingir uma estrutura cristalina gráfitica e assim aumentar o módulo da fibra.

Finalizada a produção da fibra, ocorre o tratamento superficial do material, com os processos de *finishing* (tratamento eletro-químico) e *sizing* (tratamento químico), de forma a promover uma maior aderência de resinas matrizes quando na fabricação dos compósitos.

O processo de obtenção da fibra de carbono parte da fabricação da fibra precursora (etapa 1) para depois buscar-se a produção da fibra de carbono (etapa 2). Pode também ser representado conforme exposto na Figura 2:

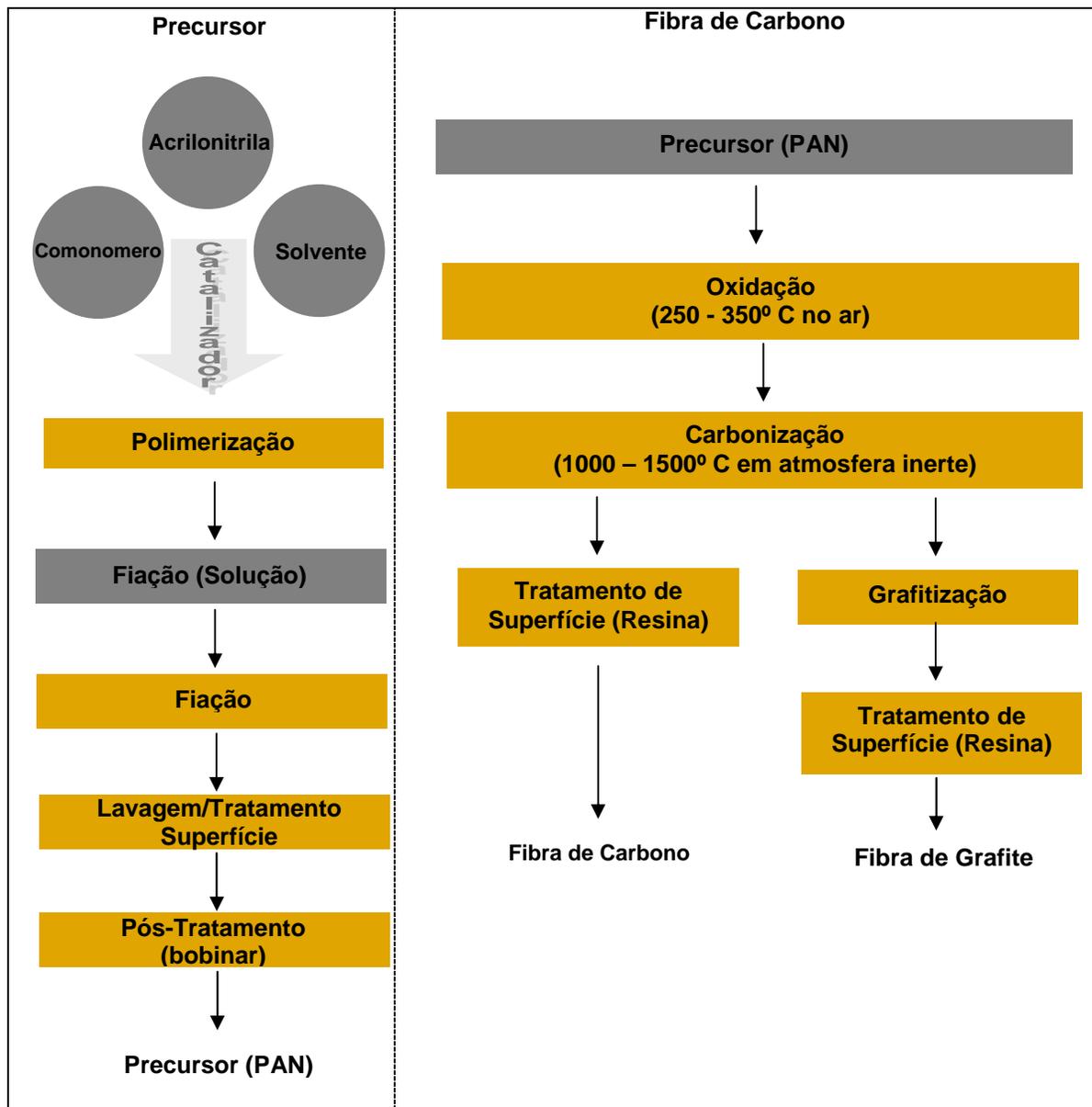


FIGURA 2 - Processo de obtenção da fibra de carbono e da fibra precursora
 Fonte: adaptado de Toho-Tenax. Disponível em:
 <[http:// www.tohotenax.com/tenax/en/products/pro_carbon02.php](http://www.tohotenax.com/tenax/en/products/pro_carbon02.php)>. Acesso em 16mai.2007

O processo descrito é parte mecânico ou físico, parte químico. Envolve uma complexa *expertise*, considerada um fator chave de sucesso da produção e um segredo comercial dos mais bem guardados pelas empresas que a detém.

Devido às características especiais de resistência à tensão, menor custo e utilização em projetos similares de outros fabricantes (URENCO), o Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo (CTMSP) optou pela utilização da fibra de carbono obtida a partir da fibra precursora de PAN no desenvolvimento de sua nova geração de ultracentrífugas (SILVA e MARQUES, 2006).

Tal escolha deveu-se ao fato de que a utilização da fibra de carbono de alto desempenho obtida a partir da PAN se dá nos rotores das ultracentrífugas, em que uma resistência específica de alto nível, combinada a uma maior velocidade do rotor e a uma menor densidade do material, constituem fatores críticos de grande relevância que possibilitam uma maior eficiência na separação isotópica. Além disso, com a modelagem (*sizing*) adequada, a fibra de carbono possui uma grande resistência à corrosão.

Em entrevista semi-estruturada, cujo instrumento de pesquisa será abordado no Capítulo 5 (Resultados), realizada com o coordenador-chefe do projeto de desenvolvimento de fibra de carbono da Marinha do Brasil, Capitão-de-Fragata André Luis Ferreira Marques, foi indicado que outros fatores também contribuíram para essa tomada de decisão, tais como: boa capacidade instalada (laboratórios bem equipados e com possibilidade de adaptação ao processo de produção de fibra), pessoal com competências específicas em materiais e disponibilidade de fibra de carbono importada, o que seria importante para uma possível engenharia reversa e testes comparativos.

Corroborando essa tomada de decisão, ressalta-se que, em 2007, a americana Hexcel Corporation, uma das grandes produtoras mundiais de fibra de carbono a partir de PAN, anunciou um acordo com a empresa USEC para o fornecimento de fibra de carbono para uma planta de enriquecimento de urânio. Segundo o comunicado pelas empresas, o método de enriquecimento por centrifugação (o mesmo utilizado pela Marinha do Brasil) demandará mais de 11.500 tubos de rotores e será de custo menor do que a alternativa de processo de enriquecimento por difusão a gás (HEXCEL PRESS RELEASE, 2007a).

3.2 Situação do mercado de fibra de carbono

Historicamente, o mercado de fibra de carbono tem passado por ciclos de alta e baixa, tornando difícil para os produtores de fibra prever adequadamente sua necessidade em termos de capacidade.

Nos primeiros anos desta década (2001-2003), não houve um crescimento significativo³ por conta do desaquecimento da indústria aeroespacial, grande consumidora de fibra de carbono (especialmente a baseada na PAN), e, também, uma conjuntura difícil com desaceleração econômica nos três grandes mercados consumidores (América do Norte, Europa e Ásia dominam cerca de 80% do consumo mundial de fibra).

Estudo do Departamento de Defesa americano (DEPARTMENT OF DEFENSE, 2005), acerca do mercado norte-americano e mundial de fibra de carbono, apresentado ao Congresso Americano em 2006, projetava um crescimento anual de seis a dez por cento até 2010, baseado, principalmente, no atendimento da demanda de aviação, novamente aquecida, e setor automotivo.

Entretanto, as projeções de crescimento foram ampliadas para cerca de 15% ao ano até 2010, levando a anúncios dos principais produtores quanto a investimentos consideráveis no aumento de sua capacidade instalada para fazer face a essa crescente demanda (COMPOSITES WORLD, 2007).

Do ponto de vista da procura, ou seja, da demanda, os principais consumidores de fibra de carbono no mundo são América do Norte (35%), Japão (15%) e Europa (30%), mas países como China, Taiwan, Índia, Bangladesh e Vietnã estão apresentando demandas em franca expansão.

Contratos significativos de fornecimento de fibra de carbono para a **aviação** (como, por exemplo, o estabelecido pela Boeing com a Toray Industries para atendimento da demanda do novo “787 Dreamliner”), para o setor de **energia alternativa**, principalmente **eólica** (as duas principais construtoras mundiais de turbinas para geração eólica – Vestas Wind Systems e Gamesa of Spain - anunciaram a substituição da fibra de vidro por fibra de carbono e contrataram a Zoltek para esse fornecimento por um período inicial de cinco anos) e de **exploração**

³ Capacidade nominal mundial teve um incremento de 2,3 por cento anuais de 2001 a 2003.

de petróleo em águas profundas levaram um grande otimismo ao mercado mundial de fibra de carbono (RASMUSSEN, 2007).

Esse novo cenário também levou a um aumento do preço de mercado da fibra de carbono em 150 por cento, já que a indústria estava despreparada para um aumento tão grande de demanda (CLARK, 2007). Para os próximos três anos estima-se um crescimento da capacidade de produção de fibra de carbono em 78 por cento (RASMUSSEN, 2007).

Trata-se de um mercado restritivo, altamente complexo do ponto de vista tecnológico e que possui um predomínio de empresas de origem japonesa. As tecnologias desenvolvidas pelas empresas são mantidas sob segredo (*proprietary technology*). Tal contexto levou a que o governo americano viesse a estudar o assunto e propor medidas para a redução dos níveis de dependência externa de fibra de carbono para sua indústria (principalmente de defesa), a ser abordado no tópico 3.2.1.2.

3.2.1 Principais produtores

O mercado mundial de fibra de carbono é protagonizado por sete grandes produtores:

- Toray Industries
- Toho-Tenax
- Mitsubishi Rayon
- Hexcel Corporation
- Zoltek
- Cytec
- SGL Group – The Carbon Company

Toray, Toho e Mitsubishi, empresas japonesas, controlam setenta por cento do mercado. Produtores antigos, como Basf, Celanese, Conoco-Philips, DuPont, Exxon, Hercules, Amoco, retiraram-se do mercado ou tiveram suas divisões de fibra de carbono absorvidas por grupos maiores.

Altos custos de capital e taxas de retorno do investimento de prazo muito longo (*very long-term payback*) são tradicionalmente apontados como barreiras à entrada de novos atores nesse mercado.

Segundo Rasmussen (2007), os sete maiores produtores mundiais tiveram investimentos anunciados em 2007 de mais de US\$ 1,4 bi em expansão ou atualização de suas plantas industriais concentradas na América do Norte, Europa e Ásia. São grandes corporações que estabeleceram marcas globais.

3.2.1.1 Produção de fibra de carbono na América do Norte

Fibras de carbono são um componente-chave para materiais compósitos avançados, os quais são usados em aplicações aeroespaciais e de defesa. Por essa razão, embora as aplicações em que se utiliza a fibra de carbono no mercado americano sejam majoritariamente civis (cerca de 95 por cento), a demanda do Departamento de Defesa dos EUA (DoD) assume um papel estratégico e recebe um tratamento diferenciado de política governamental (TRACESKI, 1999). A PAN é a fibra precursora mais utilizada, adotada como referência neste trabalho.

Dada a percepção do valor estratégico que o mercado de fibra de carbono de características especiais possui, o governo norte-americano, através principalmente de seu Departamento de Defesa, tem incentivado o fortalecimento da produção no mercado interno tanto da fibra precursora (PAN, piche ou raion), quanto da fibra de carbono.

Assim, para as vendas destinadas ao DoD há a necessidade dos produtores atenderem a normas especiais regulatórias de compras para a área da Defesa, chamadas de DFARS (*Defense Federal Acquisition Regulation Supplement*).

A fibra de PAN é a mais demandada pela indústria de defesa, principalmente aeroespacial (TAB.3).

TABELA 3 – Utilização de fibras de carbono em Sistemas Aeroespaciais

Sistema de Arma	Tipo de Fibra de Carbono		
	PAN	Piche	Raion
Mísseis			
Estratégico	X	X	X
Tático	X		X
Espacial			
Veículos Lançadores	X		X
Satélites	X	X	
Aéreo			
Asa-fixa	X	X	
Asa-rotativa	X		

Fonte: adaptado de Traceski (1999)

De acordo com as normas DFARS, fibras de carbono obtidas a partir da PAN e contidas no produto acabado devem ser manufaturadas nos EUA ou Canadá utilizando-se de PAN (fibra precursora) produzida nos EUA ou Canadá⁴.

Para o ano fiscal de 2007, o DoD americano projetou um crescimento no mercado nominal de capacidade de fibra de carbono de 35 por cento em relação a 2005. O cenário favorável do mercado de fibra atual e as restrições das normas DFARS levaram a um aumento dos produtores DFARS para cerca de 20 por cento do mercado mundial (DEPARTMENT OF DEFENSE, 2005).

A participação americana no mercado mundial de fibra de carbono é mais significativa quando se inclui a capacidade nominal de todos os produtores de fibra de carbono, inclusive os que não atendem às normas DFARS.

Relatório do DoD americano projetava que a capacidade nominal de produção de fibra de carbono (PAN) de empresas instaladas na América do Norte atingiria, em 2007, cerca de 48 por cento do mercado mundial de fibra de carbono de PAN (DEPARTMENT OF DEFENSE, 2005).

A expansão da capacidade de produção mundial nominal de fibra de carbono PAN, no período 2003-2007, em relação aos produtores situados nos EUA é ilustrada na tabela a seguir (TAB. 4):

⁴ DFARS Part 252.225-7022 Restriction on Acquisition of Polyacrylonitrile (PAN), item (b).

TABELA 4 – Capacidade nominal de produção de fibra de carbono PAN (ton.)

	2003	2004	2005	2006	2007
Produtores situados nos EUA (DFARS)	4.600	4.600	4.650	8.500	9.550
Produtores situados nos EUA (não DFARS)	11.300	11.300	10.800	14.000	14.000
Produtores situados fora dos EUA	18.378	18.378	20.454	22.704	24.904
Produção mundial	34.278	34.278	35.904	45.204	48.454

Fonte: adaptado de Department of Defense. Polyacrilonitrile (PAN) Carbon Fibers Industrial Capability Assessment. Disponível em:

<http://www.acq.osd.mil/ip/docs/pan_carbon_fiber_report_to_congress_10-2005.pdf>. Acesso em 20 dez.2007.

Verifica-se pela análise da tabela que a capacidade nominal dos produtores de fibra de PAN, nos EUA, não sofreu acréscimos no período 2003-2004, porém houve a indicação de um significativo crescimento para o ano de 2007, com a capacidade de produtores que atendem às normas DFARS dobrando.

Os EUA ainda importam fibra de carbono (principalmente do Japão), mas sua dependência externa diminuiu significativamente, especialmente em relação à fibra de PAN⁵, embora não haja produtores situados nos EUA que tenham capacitação tecnológica para a produção de fibras de módulo *high* e *ultra high*.

Atualmente, as aplicações de fibra de carbono em projetos de defesa americanos utilizam-se de fibras de carbono intermediário, mas existe a previsão de que os futuros programas do DoD necessitarão de fibras de módulo *high* e *ultra high*.

Com referência aos demais precursores, a dependência ainda é incômoda: embora a fibra de carbono a partir de raion tenha grande aplicação na indústria espacial, não há fornecedores qualificados nos EUA; para o piche, a Cytec Industries possui o *know how* adquirido com a aquisição da AMOCO em 2001, possuindo, entretanto, apenas uma linha de produção (DEPARTMENT OF DEFENSE, 2005).

Os produtores de fibra de carbono de PAN instalados nos EUA e que atendem às restrições DFARS são a Hexcel, Cytec Engineered Materials e a Toray Carbon Fibers América (TAB.5).

⁵Ressalva-se que a dependência americana é grande em relação ao Japão para os tipos de fibra de PAN de módulo elevado e muito elevado (*high* e *ultra high modulus*).

Hexcel e Cytec são empresas de origem americana que possuem vendas significativas para o Departamento de Defesa Americano (cerca de 38 e 17 por cento, em 2004, respectivamente). A Toray Carbon Fibers America é uma subsidiária japonesa da Toray, líder mundial de fibras de carbono de PAN. Embora tenha atendido às normas DFARS com a construção da fábrica de PAN (fibra precursora) em 2006, tem suas atividades voltadas majoritariamente para o setor civil, principalmente aeroespacial, sendo seus principais clientes a Boeing e a Airbus.

TABELA 5 – Produtores de fibra de carbono PAN nos EUA (DFARS)

Produtor (DFARS)	Hexcel	Cytec Engineered Materials	Toray Carbon Fibers America
Patente	Hexcel (EUA)	Cytec Industries (EUA)	Toray (Japão)
Local de fabricação do precursor	Decatur, Alabama	Greenville, South Carolina	Decatur, Alabama
Local de fabricação da fibra de carbono	Salt Lake City, Utah	Greenville e Rock Hill, South Carolina	Decatur, Alabama

Fonte: adaptado de Department of Defense. Polyacrilonitrile (PAN) Carbon Fibers Industrial Capability Assessment. Disponível em: <http://www.acq.osd.mil/ip/docs/pan_carbon_fiber_report_to_congress_10-2005.pdf>. Acesso em 20 dez.2007.

Hexcel produz fibras de carbono até o módulo *intermediate* e a Cytec, até o *standard*. A Toray possui capacidade de produção de fibra de carbono de módulo *standard*, *intermediate* e indicou a possibilidade de produção da fibra de módulo *high*, em suas instalações no Alabama (Decatur)⁶.

Existem ainda quatro produtores de fibras de carbono nos EUA que não atendem às normas DFARS (TAB.6).

⁶ Os atuais programas aeroespaciais do DoD americano requerem, **ao menos**, o módulo *intermediate*, enquanto programas mais antigos usam fibras de carbono com o módulo *standard*.

TABELA 6 – Produtores de fibra de carbono PAN nos EUA (não DFARS)

Produtor (não DFARS)	Zoltek	Mitsubishi Rayon America (Grafil)	Toho Tenax América (Fortafil Fibers)	Carbon Fiber Technology
Patente	Zoltek (EUA)	Mitsubishi Rayon Corp (Japão)	Teijin – Toho Tenax (Japão)	SGL Carbon Group (Alemanha) e Aldila Inc (EUA)
Local de fabricação do precursor	Hungria	Japão	Japão	Alemanha
Local de fabricação da fibra de carbono	Abilene, Texas	Sacramento, California	Rockwood, Tennessee	Evanston, Wyoming

Fonte: adaptado de Department of Defense. Polyacrilonitrile (PAN) Carbon Fibers Industrial Capability Assessment. Disponível em: <http://www.acq.osd.mil/ip/docs/pan_carbon_fiber_report_to_congress_10-2005.pdf>. Acesso em 20 dez.2007.

Os quatro produtores não DFARS importam para os EUA a fibra precursora de que necessitam para suas instalações de fibra de carbono. Essas companhias produzem apenas a fibra de carbono de módulo *standard* para uso industrial (DEPARTMENT OF DEFENSE, 2005).

Outros países da América do Norte possuem pequenas instalações de fibra de carbono e há iniciativas para a ampliação de suas atividades. Como exemplo, a Zoltek adquiriu as instalações de fibra acrílica da Cydsa mexicana e planeja produzir, além da fibra precursora, cerca de 2.500 toneladas anuais de fibra de carbono. No Canadá, a produtora de fibra de vidro Fibrex planeja iniciar em Leduc atividades de produção de fibras de carbono nos próximos anos.

3.2.1.2 Produção de fibra de carbono na Europa

As principais produtoras de fibra de carbono no mundo possuem instalações de produção, tanto da fibra precursora (PAN), quanto de fibra de carbono, na Europa. Devido ao aumento da demanda, há investimentos significativos anunciados na ampliação e construção de novas linhas de produção de fibra.

A japonesa Toray Industries possui uma subsidiária francesa, a SOFICAR, a qual produz fibra de carbono. Essa empresa, em acordo com a Boeing, anunciou,

em 2007, expansão em sua capacidade de produção de fibra que deverá chegar a 24.000 toneladas em 2010. Esse grupo é o líder mundial do mercado de materiais compósitos de fibra de carbono (cerca de 34%, em 2007, de *market share*). Para dezembro de 2008 foi anunciada uma expansão de suas linhas de produção na França, das atuais 3.400 toneladas para 5.200 toneladas (TORAY PRESS RELEASE, 2007).

O SGL Carbon Group é uma *joint venture* germano-americana (50/50). Possui instalações de fibra precursora PAN e fibra de carbono na Alemanha (Wiesbaden) e está construindo a sua terceira maior linha de produção de fibra em Inverness, na Escócia, com previsão de entrada em operação ao final de 2008. A previsão do grupo é triplicar sua atual capacidade de produção na Alemanha até o ano de 2012 (COMPOSITES WORLD, 2007).

A japonesa Toho possui planta de fibra de carbono na Alemanha (Wuppertal) e decidiu adicionar uma nova linha de produção de fibra com previsão de operação em agosto de 2009. Com isso, a empresa passará das atuais 3.400 toneladas anuais para 5.100 toneladas anuais de capacidade de produção na Europa. Foram previstas ampliações em suas instalações no Japão, também. Segundo comunicado da direção do grupo, esse aumento de quase 50 por cento na capacidade instalada de produção de fibra de carbono busca atender uma demanda crescente (cerca de 15 por cento/ano), particularmente do mercado europeu industrial e de aviação (TOHO-TENAX PRESS RELEASE, 2007a).

A Zoltek americana anunciou ampliações significativas em suas instalações de fibra precursora PAN e fibra de carbono na Hungria (Nyergesujfalu), passando das 800 toneladas em 2005 para até 8000 toneladas ao final de 2009. O foco desse grupo tem sido aplicações de fibras de carbono para novos mercados, como o de energias alternativas (e.g. lâminas ou pás para turbinas eólicas), estruturas reforçadas de concreto e exploração de petróleo e gás em águas profundas.

Outra empresa americana, Hexcel, finalizou, em 2008, a construção de sua nova planta de produção de fibra de carbono na Espanha (em Illescas, próximo a Toledo). As instalações de Madri passarão a trabalhar as fibras de carbono

produzidas em Toledo para fornecer a matéria-prima (prepregs – fibra de carbono reforçada com materiais resinados) para atender a demanda de componentes dos Airbus A-320/330/380 (HEXCEL PRESS RELEASE, 2007b).

A recente elevação vertiginosa do mercado de fibra de carbono tem levado a novos e significativos investimentos. Existem diversos outros grupos, menores, produtores de fibra de carbono investindo ou planejando investimentos no continente europeu. Neste tópico foram citados os principais e mais tradicionais grupos com raízes fincadas na Europa.

O cenário é extremamente favorável devido à procura pela utilização de fibra de carbono (mais leve e resistente que outros materiais) em empreendimentos novos ou que passam por um *boom*, tais como: energia alternativa, aviação, exploração de petróleo e reforços estruturais na indústria de construção civil.

3.2.1.3 Produção de fibra de carbono na Ásia

A produção de fibra de carbono na Ásia sempre foi muito concentrada no Japão, tradicional líder em pesquisa, desenvolvimento e vendas no mercado mundial. Entretanto, o desenvolvimento da China como nova potência mundial e o crescimento de alguns países, como o Vietnã, Índia, Bangladesh e Taiwan, levaram a um início de diversificação desse mercado, muito concentrado no Japão.

Os principais produtores de fibra de carbono no mundo são japoneses. Além disso, essas empresas detêm um *know how* especializado em certos segmentos da produção de fibra de carbono (fibras de módulo *ultra high*, por exemplo).

O Japão possui uma associação que congrega os produtores de fibra de carbono, no país: a *Japan Carbon Fiber Manufacturers Association* (JCMA).

Segundo a JCMA, são seus membros: Toray Industries, Inc. (PAN); Mitsubishi Rayon Co. Ltd. (PAN); Toho Tenax Co.,Ltd.(PAN); KUREHA Corporation (fibra de carbono de piche); Osaka Gas Chemical Co., Ltd. (fibra de carbono de piche); Mitsubishi Plastics, Inc. (fibra de carbono de piche) e Nippon Graphite Fiber Corporation (fibra de carbono de piche).

Toray, Toho-Tenax e Mitsubishi são os principais produtores mundiais de fibra de carbono de PAN, controlando cerca de 70 por cento do mercado mundial. Possuem subsidiárias nos principais mercados consumidores: Europa e EUA. Essas três companhias anunciaram também novos investimentos na ampliação de sua produção para fazer frente à crescente demanda. Segundo dados dessas empresas, há a expectativa de crescimento a uma taxa anual de 15 por cento até 2010, alavancado pela utilização de fibra de carbono em componentes da indústria aeroespacial (novas encomendas de Boeing, Airbus, por exemplo), lâminas de turbinas eólicas, construção civil e indústria petrolífera (RASMUSSEN, 2007).

A Mitsubishi Rayon completou em 2007 a ampliação de suas instalações em Toyohashi em cerca de 2.400 toneladas de fibra de carbono. Anunciou para 2009 o término de uma nova instalação de fibra de carbono em Otake (Japão) com capacidade de 2.700 toneladas (COMPOSITES WORLD, 2007).

A Toho-Tenax também expandiu suas atividades no Japão, ampliando a capacidade de produção na planta de Mishima em 2.700 toneladas anuais, atingindo já em 2008 a capacidade de 6.400 toneladas anuais (TOHO-TENAX PRESS RELEASE, 2007b).

A Toray concentrou seus planos de expansão em suas subsidiárias francesa e americana. Porém, anunciou para julho de 2009 uma expansão de 1.000 toneladas anuais em sua unidade de Ehime, Japão (TORAY PRESS RELEASE, 2007).

A China entrou no mercado de fibra de carbono e já conta com, pelo menos, duas plantas de fibra de carbono em operação – Dalian Xingke e Yingyou Group, cuja capacidade total atinge 820 toneladas. Diversos grupos internacionais, de olho no gigantesco mercado potencial chinês, estudam a opção de instalar em território chinês novas plantas de fibra de carbono.

3.2.1.4 Produção de fibra de carbono no Brasil

O Brasil não é um produtor, em escala comercial, de fibra de carbono de alto desempenho. Possui plantas industriais, do tipo piloto, para pesquisa, mas não

possui, ainda, uma demanda significativa e confiável que sirva de incentivo aos altos investimentos iniciais necessários ao seu desenvolvimento e comercialização.

Não obstante, a EMBRAER, empresa brasileira que produz aviões, importa a fibra de carbono que utiliza na fabricação de suas aeronaves e poderia ser um comprador importante nesse mercado, caso houvesse fornecedor nacional capacitado.

Os principais fornecedores da EMBRAER são a empresa americana Cytec e a japonesa Toho, as quais vendem fibra de carbono baseada na PAN.

Outro possível comprador seria a PETROBRAS, uma vez que essa empresa domina a exploração de petróleo em águas profundas na plataforma continental e essa área vem sendo apontada por especialistas como um possível nicho de mercado para produtos à base de fibra de carbono.

O Brasil também possui um mercado promissor para o desenvolvimento da indústria de energias alternativas. Nesse sentido, aproveitando o potencial eólico do país e buscando diversificar a matriz energética brasileira, muitas usinas de geração de energia eólica vêm sendo implantadas, principalmente no sul (e.g. Parque Eólico de Osório) e nordeste (especialmente, Ceará e Rio Grande do Norte).

A Wobben Wind Power Enercon, única empresa brasileira fabricante de aerogeradores de grande porte (800 a 2300 kW) e subsidiária de uma das empresas líderes do mercado eólico mundial (Enercon GmbH), ainda utiliza fibra de vidro em seu processo produtivo. Caso essa empresa siga a tendência de outras grandes empresas do ramo eólico no mundo e comece a utilizar a fibra de carbono em seu processo produtivo, haverá também aí um nicho de mercado a ser explorado pelos produtores de fibra de carbono do país.

Outro grande mercado para a fibra de carbono no país é a sua utilização como material de reforço estrutural na indústria de construção civil. De acordo com Beber (2003), o reforço de estruturas com fibra de carbono (técnica desenvolvida no Japão, na década de 1970, face à alta incidência de abalos sísmicos) é utilizado quando se deseja melhoria no desempenho estrutural ou aumento da capacidade de carga.

O Professor Fernando Galembeck, do Instituto de Química da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), ao apresentar na 58^a Reunião Anual da Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência (SBPC) um projeto estratégico de desenvolvimento de fibras de carbono a partir de poliácridonitrila (PAN), ressaltou a necessidade de se criar competência nacional em vários pontos da cadeia produtiva de fibra de carbono, com a formação de mais especialistas.

Segundo Galembeck, “as fibras de carbono são considerados materiais estratégicos para o país”. Justificou, ainda, a necessidade de investimento em pesquisa citando o exemplo da própria EMBRAER que, embora, utilize “largamente essas fibras em suas linhas de produção de aviões, precisa importar material”⁷.

Esse exemplo acima encontra paralelo nas necessidades de fibra de carbono da Marinha. Ao sofrer restrições à importação desse material, procurou adquiri-la no mercado nacional e não a encontrou, tendo, então, que partir para o desenvolvimento.

Caso houvesse uma estrutura nacional de produção, de capacidade reconhecida, que ofertasse um produto qualificado ao mercado, a demanda interna poderia ser atendida e esse setor, considerado estratégico, poderia se desenvolver, inclusive, caso necessário, com incentivo governamental, a exemplo do que vem sendo feito pelo governo americano que considera esse setor produtivo estratégico demais para permanecer dependente de fornecedores externos (principalmente japoneses).

O desenvolvimento de fibra de carbono de alto desempenho produzida no Brasil reduzirá a dependência externa desse insumo estratégico. Existe demanda nacional possível (conforme exemplos acima citados) para esse mercado, mas ainda faltam articulação e incentivo, inclusive governamental, para que haja essa produção.

⁷Entrevista disponível em:

<<http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=010165060727>>. Acesso em 24 mar.2008.

3.3 Restrições de mercado

As fibras de carbono e compósitos de características estruturais para serviços de alto desempenho constituem materiais sensíveis, de alta tecnologia, cujo acesso sofre restrições por conta de suas aplicações.

Segundo Traceski (1999), as fibras de carbono são consideradas materiais de uso dual, o que implica em que elas possam ser usadas tanto para atividades exclusivamente civis, quanto militares.

Por conta de suas propriedades especiais, esses materiais são objeto de salvaguardas específicas por parte de organizações internacionais, como *International Atomic Energy Agency (IAEA)*⁸, *Wassenaar Arrangement*⁹ e *Nuclear Suppliers Group (NSG)*¹⁰.

Diversos tratados internacionais, ratificados pelo Brasil, tais como o Tratado de Não-Proliferação Nuclear (TNP) e Tratado de Tlatelolco, respaldam e legitimam o controle que é feito internacionalmente sobre a transferência ou exportação de materiais, equipamentos, tecnologia ou *software* que possam ser utilizados com outros fins (*dual-use*), não pacíficos.

No plano interno, o Brasil editou, inclusive, lei ordinária (Lei nº 9.112, de 10 de outubro de 1995), regulamentada pelo Decreto nº 1.861, de 15 de abril de 1996, que reproduz, com algumas adaptações, as diretivas específicas contidas nos documentos INFCIRC/254/Rev.2/Part1 e INFCIRC/254/Rev.2/Part2/Mod1, editados pela IAEA (2005), doravante chamada simplesmente de Agência, referentes à exportação de bens sensíveis diretamente vinculados, particularmente sobre as

⁸ *International Atomic Energy Agency* (Agência Internacional de Energia Atômica), fundada em 1957 e baseada em Viena, Áustria, é uma organização internacional autônoma vinculada à Organização das Nações Unidas com 132 países membros até agosto de 2001 (inclusive o Brasil). Ela se ocupa com o controle da tecnologia nuclear a fim de evitar a proliferação de armas nucleares e o desenvolvimento da energia nuclear para fins pacíficos.

⁹ *Wassenaar Arrangement* é uma organização internacional estabelecida com o fim de contribuir para a segurança e estabilidade, regional e internacional, através da promoção da transparência e maior responsabilidade na transferência de armas convencionais e materiais e tecnologias de uso duplo. Presentemente, conta com 40 países, entre os quais não se inclui o Brasil.

¹⁰ O *Nuclear Suppliers Group (NSG)* é uma organização instituída na década de 1970 após a utilização de um artefato nuclear por uma nação declarada não nuclear. Congrega um grupo de países detentores de tecnologia e materiais nucleares e busca contribuir para a não proliferação de armas nucleares através da implementação de diretivas para as exportações de materiais nucleares e relacionados, objetivando assegurar que estes não sejam desviados para atividades nucleares sem salvaguardas. O Brasil é, desde 1996, um dos seus Estados-membro.

transferências de Equipamento, Material e Tecnologia Nuclear e de Equipamento e Material de Uso Duplo e Tecnologia a eles relacionada, de aplicação na área nuclear.

As organizações internacionais acima citadas exercem acompanhamento sobre a transferência de tecnologia e materiais especiais através da elaboração de listas de controle, as quais são submetidas aos seus membros com o intuito de restringir a utilização dos mesmos por países que não detenham sua tecnologia e produção e controlar a transferência, se houver, a fim de evitar desvios de finalidade.

A Lista de Controle da Agência (*List of nuclear-related dual-use equipment, materials, software, and related technology*) estabelece diretamente como material a ser controlado, dentre os utilizados nas partes rotativas das centrífugas, os materiais filamentosos ou fibrosos de carbono adequados para o uso em compósitos estruturais e que tenham um módulo específico de $12,7 \times 10^6$ m ou maior e uma resistência específica à tensão de $23,5 \times 10^4$ m ou maior (IAEA, 2005).

A resistência específica e o módulo específico caracterizam o limite de resistência à tração em relação à densidade relativa e o módulo de elasticidade em relação à densidade relativa, respectivamente.

A unidade de módulo específico é indicada, na classificação da Agência, em metros (m) por ser o resultado da divisão do módulo de Young (em N/m^2) pelo peso específico (em N/m^3). Já a resistência específica é o resultado da divisão da resistência à tensão (em N/m^2) pelo peso específico (em N/m^3).

A Lista de Controle da Wassenaar Arrangement (*List of Dual-Use Goods and Technologies*) inclui entre os materiais avançados de categoria 1 (sensíveis) a fibra de carbono componente de compósitos estruturais (WASSENAAR ARRANGEMENT, 2005).

A Agência vistoria os Estados signatários do TNP, através do artigo III desse tratado internacional, que prevê o compromisso do Estado-membro em aceitar salvaguardas. Na realidade, não é correto falar-se em controle por parte da Agência, pois os Estados, no Direito Internacional, são soberanos. Por meio do TNP, o Estado permite à Agência vistoriar para certificar que o que se pratica está coerente com o que se declara.

Por salvaguardas, entende-se a monitoração (inspeções anunciadas, não anunciadas, listas de controle, vigilância de instalações) de material nuclear e afim para assegurar que não sejam utilizados para produção de armas de destruição em massa.

A Agência também, por meio da *Information Circular 540* (INFCIRC/540), aprovou documento, em maio de 1997, intitulado “Modelo de Protocolo Adicional ao TNP entre os Estados e a Agência de Energia Atômica Internacional para a Aplicação de Salvaguardas”, na qual se asseguram aos inspetores designados acesso físico adicional aos locais do país-membro onde haja ou possa haver material nuclear, expande-se o uso de inspeções não anunciadas e se permite a coleta de amostras ambientais (IAEA, 1997).

O Modelo de Protocolo Adicional ao TNP, ainda não ratificado pelo Brasil, também prevê em seu artigo 2º, alínea a, item (ix), (a), que o Estado-membro tem a obrigação de prover informações à Agência, declarando, para cada exportação de material não nuclear listado no Anexo II do Protocolo, a identificação, quantidade, local intencionado de uso no Estado recebedor (*end user*) e data da exportação.

Por sua vez, o Estado-membro importador, se solicitado, tem a obrigação de fornecer informações sobre a exportação recebida. Com essa sistemática, objetiva-se acompanhar o fluxo de materiais e tecnologias sensíveis e salvaguardá-las, a fim de que não sejam desviadas em sua utilização.

Uma consequência importante disso é que o comércio desses itens é bastante restrito, sujeito a exigências severas e objeto de uma dependência a condições externas indesejável para um país que almeja desenvolver tecnologia em áreas estratégicas, como o Brasil.

3.4 Pesquisa Cooperativa

O contexto em que surge a idéia de pesquisa cooperativa no mundo contemporâneo está muito ligado ao Japão e seu grande esforço econômico pós Segunda Grande Guerra.

Naquele país, o governo encorajou suas empresas a partilharem livremente suas informações, financiando consórcios industriais que se

concentrassem em pesquisas que gerassem vantagens competitivas em mercados promissores.

Diferentemente de outros países, como os Estados Unidos e países europeus, a legislação japonesa era mais flexível com relação à prevenção de monopólios e *trusts* industriais.

A cooperação entre empresas com o intuito de produzir inovações tecnológicas e vantagens competitivas era considerada legal e, portanto, fora do escopo de eficácia da legislação antitruste japonesa, datada de 1947 (*Antimonopoly Act*).

O Ministério de Indústria e Comércio Internacional japonês favoreceu ainda mais esse processo ao editar norma em 1961 (*Act on the Mining and Manufacturing Industry Technology Research Association*), encorajando e promovendo projetos de pesquisa cooperativa ou *research joint ventures*. Esse ato, bem como os esforços proativos do gabinete japonês, criou um ambiente propício ao grande desenvolvimento das *joint ventures* japonesas, as quais não demoraram a dar resultados positivos (ROLLER *et al*, 1997).

De fato, o crescimento da competitividade japonesa, particularmente em setores de alta tecnologia, foi logo percebido pela União Européia e, posteriormente, pelos Estados Unidos e atribuído por políticos, industriais e acadêmicos desses países como fruto de um ambiente de negócios mais cooperativo, que se transformou num fator de vantagem competitiva (LONGO e OLIVEIRA, 2000).

Diante desse cenário, a União Européia decidiu seguir na mesma direção japonesa. Publicou, em 1968, medida com o intuito de excluir do escopo de sua legislação *antitruste* (*EEC Treaty*) as empresas e empreendimentos que atuassem colaborativamente em Pesquisa e Desenvolvimento (P&D): o *Notice of Cooperation between Enterprises*.

Os Estados Unidos demoraram ainda alguns anos até alterarem suas rígidas regras antitruste. Além da evidência do sucesso oriental (cujo exemplo mais vigoroso era o Japão), tal se deu também devido à percepção de que o sucesso de suas empresas era a perpetuação do sucesso da própria nação.

Assim, em 1984, foi promulgado o *National Cooperative Research Act*, instrumento legal que respaldou e legitimou certas atividades conjuntas de pesquisa e desenvolvimento tecnológico entre empresas concorrentes. Esse diploma legal representou um relaxamento na legislação antitruste americana capitaneada pela *Sherman Act* (1890), a qual proibia qualquer tipo de associação empresarial capaz de influenciar o comércio internacional ou entre federações americanas e baniu também qualquer acordo entre empresas que pudesse vir a monopolizar o mercado.

Outro diploma legal americano que pode ser considerado um marco naquele país para o desenvolvimento da pesquisa cooperativa é o *Technology Transfer Act*, de 1986, pelo qual foram criados os *Cooperative Research and Development Agreements* (CADRA), os quais autorizaram que os laboratórios e instituições públicas americanos pudessem opera em P&D com empresas privadas (LONGO e OLIVEIRA, 2000).

Sob a chancela de um CADRA, uma instituição pública americana, como, por exemplo, um laboratório federal, podia cooperar em P&D com a iniciativa privada e ceder a esta o direito de propriedade intelectual resultante do trabalho conjunto, retendo uma licença não exclusiva da referida propriedade.

Atualmente, a pesquisa cooperativa encontra-se presente nos países mais desenvolvidos, dispendo de proteção legal e incentivo governamental. Tornou-se um dos principais instrumentos de desenvolvimento e difusão tecnológica (MINISTÉRIO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA, 2005).

No Brasil, o Ministério de Ciência e Tecnologia (MCT) apresenta um conceito de pesquisa cooperativa, também chamada de projeto multicliente, *joint industry project* ou *cooperative research*, que convém ser reproduzido:

O que aqui chamamos de pesquisa cooperativa se caracteriza por um projeto de pesquisa aplicada, de desenvolvimento tecnológico ou de engenharia, objetivando a busca de novos conhecimentos sobre um determinado produto, sistema ou processo, ou de seus componentes, executado de forma cooperativa entre instituições e empresas que participam com recursos financeiros ou técnicos, custeando ou executando partes do projeto, tendo acesso, em contra-partida, às informações nele geradas. Essa pesquisa objetiva o desenvolvimento de tecnologia, mas seus resultados ficam em nível pré-comercial, o que permite a adesão ao projeto de empresas competidoras entre si (MINISTÉRIO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA, 2005).

O termo pesquisa cooperativa é, na verdade, uma denominação genérica para esses tipos de arranjos compartilhados de instituições, cujo objetivo comum é o desenvolvimento tecnológico. Também são conhecidos como redes cooperativas, projetos multicientes, centros cooperativos, consórcios, entre outros. Na literatura estrangeira, de língua inglesa, são mais conhecidos como *research joint ventures* (RJV) ou *consortias*.

São características relevantes da pesquisa cooperativa, principalmente nos cenários econômico e tecnológico atuais, as seguintes: custo menor, amplo campo de aplicação, possibilidade de difusão, acessibilidade para pequenas e médias empresas (PME) e grande capacidade de integração universidade - comunidade tecnológica - empresa.

Segundo Longo e Oliveira (2000), a pesquisa cooperativa deve ser entendida como a “reunião de instituições de pesquisa e empresas que participam com recursos financeiros ou técnicos, caracterizando-se pela definição de uma área temática a ser explorada ou de um projeto específico visando produzir uma inovação ou resolver um problema tecnológico”.

Roller *et al* (1997), ao abordarem os motivos que levam empresas a se associarem em pesquisas cooperativas, elencam, entre os motivos mais enfatizados na literatura econômica, os seguintes:

- Internalização dos *spillovers*¹¹ associados com P&D (esse efeito desejado sobrepõe os problemas do empreendedor solitário – *free rider*);
- Redução de custos através da divisão dos custos de P&D entre os parceiros da pesquisa cooperativa.

Acrescentam esses autores que mais dois fatores atraem as empresas a se associarem:

- Complementaridade no mercado do produto;
- Heterogeneidade das empresas.

¹¹O termo *spillover* não possui tradução teórica específica. Por isso, será sempre usado em inglês; seu significado está mais ligado à idéia de derramamento, de algo que começa num determinado ponto e transborda, transcende. Seria algo como uma externalidade.

Comentando esses fatores de incentivo à formação de RJV, os *spillovers* são importantes, pois à medida que uma empresa investe em P&D, obtém resultados e os repassa para os outros, esses podem reduzir seus próprios gastos. Se o empreendimento é daqueles em que todos os resultados são divididos, os *spillovers* são internalizados, com benefícios para todos os integrantes do projeto.

A redução de custos em P&D pode ser substancial se as empresas forem de um mesmo ramo industrial, já que elas podem estar perseguindo os mesmos objetivos, buscando a mesma invenção, usando os mesmos métodos e, por conseguinte, duplicando os esforços mutuamente. Este é um incentivo poderoso já que permite a otimização dos recursos e evita o desperdício de esforços.

Sakakibara e Bransteter (2000) afirmam que o potencial de ganho, em termos de resultado de P&D, é maior entre as empresas que atuam na mesma cadeia tecnológica de produção.

A questão da redução de custos assume um papel importante inclusive em aplicações militares, onde o governo assume um papel central na demanda. Em recente estudo do Departamento de Defesa americano (DoD), ao se abordar a questão de novas tecnologias de fibra de carbono aplicáveis em aparatos militares americanos, recomendou-se que para que a redução de custos seja possível faz-se necessário o incentivo a programas que conjuguem a participação conjunta de empresas, universidades e governo, ou seja, formação de consórcios de pesquisa em cooperação (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2005).

As hipóteses da complementaridade de produtos e heterogeneidade de empresas como fatores atrativos para a formação de RJV foram testadas empiricamente por Roller *et al.* Segundo esses autores, empresas tendem a se unir com outras de tamanho similar e que não sejam seus concorrentes diretos; o mais comum entre os casos pesquisados de RJV é a associação entre empresas que possuam linhas de produtos complementares, tais como a de equipamentos eletrônicos e de comunicações, ou a de autopeças e automotiva, por exemplo.

Sakakibara e Bransteter (2000), analisando as razões do sucesso dos consórcios de pesquisa japoneses, enfatizam que os possíveis benefícios dessas

associações são instrumentos para que as externalidades ou *spillovers* de P&D sejam internalizadas.

Em geral, os consórcios de P&D japoneses envolvem a concessão de subsídios para os dispêndios de P&D do consórcio. Além disso, o governo encoraja a formação de consórcios em que haja a completa disseminação de todos os resultados da pesquisa aos participantes e em que as instituições a serem selecionadas para participar do consórcio tenham linhas de pesquisa complementares. Essas tendências induzidas pelo governo japonês levam a que a internalização dos resultados do consórcio seja bem grande.

Outras duas características destacadas por Sakakibara e Bransteter (2000) nos consórcios japoneses de pesquisa atuais são que dificilmente eles reúnem instituições que sejam rivais diretas no mercado e, normalmente, são direcionados para mercados em que as empresas japonesas desempenham um papel pequeno no comércio e produção globais.

Os autores acima, em trabalho interessante, examinaram o impacto de um grande número de consórcios de pesquisa patrocinados ou subsidiados pelo governo japonês sobre a produtividade da pesquisa das instituições participantes. Para tal, valeram-se de um indicador: a quantidade de patentes obtidas pelas instituições participantes antes, durante e depois de suas participações no consórcio.

Katz (1986) estabeleceu quatro estágios lógicos na formação dos consórcios de pesquisa:

1. empresas de um ramo industrial decidem se devem ou não participar do consórcio de P&D;
2. escolhem as regras para o rateio dos custos de P&D e divisão dos resultados;
3. empresas obtêm ganhos de seus esforços de P&D, parametrizados em termos de redução de seus custos marginais;
4. empresas, então, estabelecem níveis de produção fora do ambiente cooperativo.

Sakakibara e Bransteter (2000) acentuam em seus trabalhos que os consórcios de pesquisa cooperativa têm probabilidade de causarem um maior

impacto quando são voltados para P&D básica e não para a aplicada. Entretanto, o Ministério de Ciência e Tecnologia (2005) entende que a pesquisa cooperativa deva ser voltada para pesquisa aplicada.

Link (1996), citado por Roller *et al* (1997), indica que cerca de 59% das *research joint ventures* (RJV) pesquisadas nos Estados Unidos estão voltadas para questões que envolvem inovação em processos, ao passo que cerca de 36% estão orientadas ao produto.

Oliveira e Longo (2000) consideram o instrumento da pesquisa cooperativa como um estágio avançado das relações entre universidades, centros de pesquisa, empresas e, eventualmente, governo. Com referência ao governo brasileiro, este tem começado a atuar no apoio a iniciativas de pesquisa cooperativa através do MCT e de suas agências de fomento, como, por exemplo, a FINEP, patrocinadora do desenvolvimento de fibra de carbono de características especiais no projeto liderado pelo Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo.

A literatura pesquisada elenca diversas razões para instituições se associarem em projetos de pesquisa e algumas já foram aqui abordadas. Sumarizando, neste ponto, algumas razões ensejadoras de incentivo, podem ser citadas:

- acesso a laboratórios e instalações;
- possibilidade de usufruir de benefícios concedidos pelos governos (incentivos fiscais e não fiscais);
- acesso a recursos humanos qualificados e a resultados de pesquisas;
- solução para problemas específicos;
- divisão de custos, riscos e tempo atinentes a pesquisas, desenvolvimentos, produção e lançamento de novos produtos no mercado.

Existem, obviamente, cautelas a serem adotadas. Conforme abordado, há empresas e instituições que, ao se associarem, tem mais probabilidade de sucesso, por conta de características de mercado (similaridade de ramo industrial, complementaridade de produtos), obtenção de incentivos, sinergia maior entre os participantes com benefícios para todos, entre outros. Com referência a essa

sinergia, questão importante envolve a etapa de negociação do acordo de cooperação. Katz (1986) menciona que essa fase de negociação dos termos da cooperação é crucial e pode significar o sucesso de toda a empreitada. Clark (1998) a define como um processo que envolve ligações entre pessoas, o qual se pretende venha a resultar em um acordo e compromisso para uma ação almejada.

No processo de negociar, que para muitos é uma arte, Freitas (1994) entende que “a confiança entre as partes, ainda que difícil, é construída principalmente pelo comportamento durante o processo, ou seja, pela atitude de colaboração para a solução do problema”.

Portanto, um grande obstáculo ao sucesso dos projetos de pesquisa cooperativa, a par dos desafios tecnológicos, é a negociação. O relacionamento maduro e bem definido que se espera de todos os seus participantes é *conditio sine qua non* do sucesso do empreendimento.

Não resta dúvida que o modelo de RJV utilizado por americanos, europeus e japoneses se constitui em importante ferramenta de fomento e incentivo ao desenvolvimento de novas tecnologias, mas já há, inclusive, uma grande variedade de outras experiências que vêm sendo estudadas como, por exemplo, a de Taiwan.

Em Taiwan, o modelo institucional adotado e incentivado pelo governo, diferentemente da maioria das experiências japonesas, americanas e européias em que a redução de custos é freqüentemente a mola precursora preponderante, enfatiza o aprendizado tecnológico e o desenvolvimento de ponta da indústria local como os principais objetivos desses arranjos colaborativos (MATHEWS, 2001).

O modelo taiwanês floresceu na década de 1990 quando foi estabelecido que a ênfase seria para encorajar a formação de consórcios que pudessem cooperar para elevar o nível de capacidade tecnológica da indústria local até o ponto de competição com mercados tecnológicos avançados.

A indústria de Taiwan, particularmente a de tecnologia da informação (computadores pessoais, estações de trabalho, multiprocessadores, sistemas de telecomunicações, entre outros) cresceu, utilizando-se de um modelo que conseguiu catalisar os incentivos governamentais (fundos e utilização de laboratórios oficiais)

com o empenho de empresas, principalmente de pequenos e médios empreendimentos, os quais valeram-se de sua flexibilidade inovadora e adaptabilidade como fatores-chave para o sucesso.

Para o caso brasileiro, a utilização de pesquisa cooperativa nos moldes acima expostos se mostra um instrumento ainda mais relevante às áreas de pesquisa, desenvolvimento e inovação (P&D&I), dada a carência de recursos materiais e tecnológicos. É a possibilidade de otimização de esforços.

Nesse sentido, a utilização desse instrumento se torna extremamente interessante para a pesquisa da fibra de carbono de alto desempenho para utilização, por exemplo, em ultracentrífugas nucleares.

4. METODOLOGIA

Gil (2007) define método científico como o conjunto de procedimentos intelectuais e técnicos para se atingir o conhecimento.

Para o autor acima, a pesquisa é o processo formal e sistemático de desenvolvimento do método científico, cujo objetivo fundamental é descobrir respostas para problemas mediante o emprego de procedimentos científicos.

Silva e Menezes (2005) conceituam pesquisa como o conjunto de ações, propostas para encontrar a solução para um problema, que têm por base procedimentos racionais e sistemáticos.

O que diferencia o conhecimento científico obtido mediante a pesquisa das demais formas de conhecimento é sua verificabilidade.

A pesquisa social deve ser entendida como o processo que, utilizando a metodologia científica, permite a obtenção de novos conhecimentos no campo da realidade social, a qual, em sentido amplo, envolve todos os aspectos referentes ao homem em seus diversos relacionamentos com outros homens e instituições sociais (GIL, 2007).

Gil (2007) classifica a pesquisa, quanto às suas finalidades, da seguinte forma:

- Pura¹²: busca o progresso da ciência, procura desenvolver os conhecimentos científicos sem a preocupação direta com suas aplicações e conseqüências práticas. Seu desenvolvimento tende a ser bastante formalizado e objetiva à generalização, com vistas na construção de teorias e lei. Envolve verdades e interesses universais;
- Aplicada: tem como característica fundamental o interesse na aplicação, utilização e conseqüências práticas dos conhecimentos. Objetiva gerar conhecimentos para aplicação imediata, prática, numa realidade circunstancial (solução de problemas específicos). Envolve verdades e interesses locais.

¹² Para Silva e Menezes (2005) a pesquisa, do ponto de vista de sua natureza, é classificada em básica e aplicada. Tem, porém, o mesmo sentido atribuído por Gil (2007).

Quanto à forma de abordagem do problema, a pesquisa pode ser (SILVA e MENEZES, 2007):

- Quantitativa: considera que tudo pode ser quantificável, o que significa traduzir em números opiniões e informações para classificá-las e analisá-las. Requer o uso de recursos e de técnicas estatísticas (percentagem, média, moda, mediana, desvio-padrão, coeficiente de correlação, análise de regressão, entre outros);
- Qualitativa: considera que há uma relação dinâmica entre o mundo real e o sujeito, isto é, um vínculo indissociável entre o mundo objetivo e a subjetividade do sujeito que não pode ser traduzido em números. A interpretação dos fenômenos e a atribuição de significados são básicas no processo de pesquisa qualitativa. Não requer o uso de métodos e técnicas estatísticas. O ambiente natural é a fonte direta para coleta de dados e o pesquisador é o instrumento-chave. É descritiva. Os pesquisadores tendem a analisar seus dados indutivamente. O processo e seu significado são os focos principais de abordagem.

No que concerne aos seus objetivos, Gil (2007) esclarece que a pesquisa pode ser:

- Exploratória: tem como principal finalidade desenvolver, esclarecer e modificar conceitos e idéias. Visa proporcionar maior familiaridade com o problema com vistas a torná-lo explícito ou a construir hipóteses. Envolve levantamento bibliográfico; entrevistas com pessoas que tiveram experiências práticas com o problema pesquisado; análise de exemplos que estimulem a compreensão do fato estudado; levantamento de problemas sob a forma de perguntas; visitas ao local da pesquisa. Assume, em geral, a forma de Pesquisa Bibliográfica e Estudo de Caso. É desenvolvida com o objetivo de proporcionar visão geral, de tipo aproximativo, acerca de determinado fato em situações nas quais se tem pouca ou nenhuma informação sobre a questão ou problema. É realizada especialmente quando o tema escolhido é pouco

explorado e torna-se difícil formular hipóteses precisas e operacionalizáveis;

- Descritiva: visa descrever as características de determinada população ou fenômeno ou o estabelecimento de relações entre variáveis. Envolve o uso de técnicas padronizadas de coleta de dados: questionário e observação sistemática. Assume, em geral, a forma de Levantamento;
- Explicativa (ou causal): visa identificar os fatores que determinam ou contribuem para a ocorrência dos fenômenos. É o tipo de pesquisa que mais aprofunda o conhecimento da realidade porque explica a razão, o “porquê” das coisas. Quando realizada nas ciências naturais, requer o uso do método experimental; nas ciências sociais, requer o uso do método observacional. Pode-se dizer que o conhecimento científico está assentado nos resultados obtidos na pesquisa explicativa¹³. Assume, em geral, as formas de Pesquisa Experimental e Pesquisa *Expost-facto*.

No que se refere aos procedimentos técnicos (SILVA e MENEZES, 2005), a pesquisa pode ser:

- Bibliográfica: elaborada a partir de material já publicado, constituído principalmente de livros, artigos de periódicos e atualmente com material disponibilizado na *internet*;
- Documental: elaborada a partir de materiais que não receberam tratamento analítico;
- Experimental: quando se determina um objeto de estudo, selecionam-se as variáveis que seriam capazes de influenciá-lo, definem-se as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto;
- Levantamento (*survey*): quando a pesquisa envolve a interrogação direta das pessoas cujo comportamento se deseja conhecer;

¹³ Isto não quer dizer que as pesquisas exploratórias e descritivas tenham menos valor que as explicativas, uma vez que normalmente constituem uma etapa prévia e indispensável à obtenção de explicações científicas.

- Estudo de caso: quando envolve o estudo profundo e exaustivo de um ou poucos objetos de maneira que se permita o seu amplo e detalhado conhecimento;
- Pesquisa *Expost-Facto*: quando o “experimento” se realiza depois dos fatos;
- Pesquisa-Ação: quando concebida e realizada em estreita associação com uma ação ou com a resolução de um problema coletivo. Os pesquisadores e participantes representativos da situação ou do problema estão envolvidos de modo cooperativo ou participativo;
- Pesquisa Participante: quando se desenvolve a partir da interação entre pesquisadores e membros das situações investigadas¹⁴.

Dentro da classificação apresentada acima, a presente dissertação pode ser caracterizada como uma **pesquisa aplicada**, do ponto de vista de sua finalidade ou natureza; **qualitativa**, quanto à forma de abordagem do problema; **exploratória**, no que concerne aos seus objetivos. Do ponto de vista dos procedimentos técnicos, estratégia de pesquisa ou delineamento, trata-se principalmente de pesquisa **bibliográfica**, mas que também conterà uma parcela de pesquisa **documental**.

Deve ser considerada, ainda, como pesquisa **participante**, uma vez que se desenvolve a partir da interação entre o pesquisador e membros da situação investigada.

Utilizou-se como método de análise para compor o contexto da pesquisa qualitativa o instrumento de Matriz Lógica (também conhecido como Marco Lógico, *Logical Framework*, *Logframe*, MPP - Matriz de Planejamento de Projetos). Esse instrumento é uma ferramenta muito difundida entre agentes financiadores internacionais (BID, Banco Mundial, AIEA, GTZ alemã) para planejamento, monitoramento e avaliação de projetos sociais. O principal objetivo da metodologia é oferecer uma estrutura lógica comum e proporcionar uma síntese das informações sobre os projetos (ADULIS, 2001).

¹⁴ Gil (2007) estabelece essa classificação dentro do que chama de delineamento da pesquisa, ou seja, o contraste entre a teoria e os fatos em uma forma de estratégia ou plano geral.

Para a coleta de dados, houve também a utilização da técnica de entrevistas, do tipo semi-estruturada e não estruturada, com informantes-chaves, conforme será apresentado no Capítulo 5 deste trabalho.

Esse tipo de entrevista é recomendada nos estudos exploratórios, os quais visam abordar realidades pouco conhecidas pelo pesquisador, ou então oferecer visão aproximativa do problema pesquisado.

Segundo Gil (2007), “a entrevista é bastante adequada para a obtenção de informações acerca do que as pessoas sabem (...) bem como acerca das suas explicações ou razões a respeito das coisas precedentes”.

Trata-se de técnica de coleta de dados muito utilizada no campo das ciências sociais. A sua utilização foi interessante, pois possibilitou a coleta de informações acerca do tema objeto da pesquisa com profissionais que participaram de todo o ciclo de desenvolvimento do projeto.

5. RESULTADOS

Tendo em vista as questões de pesquisa levantadas por ocasião da definição dos objetivos deste trabalho, buscou-se caracterizar três segmentos importantes: a produção de fibra de carbono de características especiais, as restrições desse mercado de fibra de carbono e a pesquisa cooperativa.

As razões que levaram à formação de um consórcio de instituições, reunidas e coordenadas por uma instituição líder (CTMSP), em um modelo de arranjo organizacional para pesquisa e desenvolvimento tecnológico, conhecido como pesquisa cooperativa, podem ser esquematizadas, do ponto de vista de um encadeamento lógico-temporal, conforme a seguir:

- Contrato da Marinha do Brasil com as Indústrias Nucleares Brasileiras (INB) para fornecimento de uma rede de ultracentrífugas (cascatas);
- Expansão na fabricação de ultracentrífugas;
- Diminuição no estoque de fibra de carbono (importada);
- Restrições à importação desse insumo;
- Verificação de possíveis fornecedores nacionais;
- Não obtenção de fornecedores no país;
- Busca de parceiros para o desenvolvimento nacional desse insumo;
- Projeto de pesquisa cooperativa; e
- Domínio de tecnologia para fabricação de fibra de carbono nacional (escala pré-comercial).

Em um cenário nacional de grandes dificuldades orçamentárias, projetos que consigam conjugar recursos materiais e humanos dispersos são sempre necessários e desejáveis para qualquer organização.

Nesse sentido, o projeto de pesquisa cooperativa apresentado pela Marinha do Brasil, por meio de seu Centro Tecnológico, mostra-se interessante, do ponto de vista da busca pelo desenvolvimento de tecnologia e solução de um problema de produção (obtenção de fibra de carbono de características especiais) e pertinente, do ponto de vista dos escassos recursos materiais e humanos

disponíveis, os quais puderam ser conjugados em prol de um objetivo pré-determinado.

A pesquisa cooperativa caracteriza-se por ser uma forma compartilhada de desenvolvimento de tecnologia em que instituições e empresas atuam de forma cooperada, com recursos financeiros ou técnicos, custeando ou executando partes do processo, a fim de resolver um problema tecnológico ou produzir uma inovação. Em geral, os resultados ficam em nível pré-comercial.

Suas características de redução de custos e conjugação de esforços materiais e intelectuais a tornaram um dos principais instrumentos de desenvolvimento e difusão tecnológica nos países desenvolvidos (MINISTÉRIO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA, 2005).

Na verdade, o termo pesquisa cooperativa é uma denominação genérica para esses tipos de arranjos compartilhados de instituições, cujo objetivo comum é a inovação e o desenvolvimento tecnológico.

Redes cooperativas, projetos multiclientes, centros cooperativos, consórcios são outros termos muito utilizados para se referir a esses arranjos. Na literatura inglesa são identificados como *research joint ventures* (RJV) ou *consortias*.

Esses arranjos são comuns e já foram amplamente testados e aprovados em países desenvolvidos, onde se constituem em um dos principais instrumentos de desenvolvimento e difusão de tecnologias, conforme abordado no tópico 3.3, deste trabalho.

Sumarizando algumas vantagens que podem ser obtidas nesse tipo de parceria, pode-se listar:

- Divisão de custos, riscos e tempo atinentes a pesquisas, desenvolvimentos, produção e lançamento de novos produtos no mercado;
- Acesso a laboratórios e instalações;
- Possibilidade de usufruir de benefícios concedidos pelos governos (incentivos fiscais e não fiscais);
- Acesso a recursos humanos qualificados e a resultados de pesquisas;
- Solução para problemas específicos;

- Sinergismo provocado pela eficiência com que os diferentes parceiros abordam os problemas que lhes são mais afins.

Existem cautelas a serem adotadas quando da formação dessas parcerias. Um risco muito discutido e abordado no Capítulo 3 diz respeito à fase de negociação do projeto.

É muito importante nessa fase de discussões e no estabelecimento do acordo de parceria (as adesões são, normalmente, formalizadas entre a instituição líder e participantes por meio de um instrumento contratual) serem claramente debatidos e compreendidos os objetivos do projeto e o que se espera de cada um dos participantes, ou seja, quais são suas atribuições e responsabilidades no empreendimento. Isso evita a perda de confiança entre as partes.

Assim, no estabelecimento de arranjos cooperativos é desejável que cada um dos participantes tenha consciência plena de seu papel, de maneira a evitar falsas expectativas ou gerar frustrações e falta de motivação. A confiança entre os parceiros deve ser cultivada e mantida durante e mesmo após o encerramento do projeto de pesquisa cooperativa.

Na pesquisa bibliográfica e documental realizada, evidenciou-se que a produção de fibra de carbono de características adequadas à utilização como um dos insumos da fabricação de ultracentrífugas requer uma complexa tecnologia. A fibra de carbono de características especiais (alta resistência, boa rigidez e leveza) é fabricada por alguns poucos produtores no mundo, os quais, por razões comerciais e políticas, segregam informações sobre sua produção e restringem sua comercialização.

A necessidade de desenvolvimento da PAN e da fibra de carbono no país é decorrente de restrições sofridas pelo CTMSP aos pedidos de importação desse insumo essencial para suas ultracentrífugas.

Não há produção no Brasil do tipo de fibra de carbono que atenda às exigências e requisitos necessários para o tipo de aplicação desejado pela Marinha do Brasil, em seu Programa Nuclear. O mercado externo é sujeito a oscilações e intempéries, comuns nesse tipo de comércio internacional (insumos de alta

tecnologia). Além disso, potenciais bloqueios de compra decorrentes de interesses estrangeiros estratégicos não são incomuns para essa classe de importação.

De fato, verificou-se que fornecedores internacionais usuais de fibra de carbono de características de alto desempenho recusaram-se a vender, sem satisfatórios esclarecimentos, seus produtos ao Brasil¹⁵. A maior parte desses fornecedores não se estendeu em explicações, apenas recusando-se à venda. Entretanto, houve o registro de um fornecedor que respondeu ao pedido de exportação feito pela Marinha do Brasil informando que não poderia concretizar a venda por motivos de restrição governamental americana¹⁶.

Essa questão da restrição ao comércio internacional de certos itens foi verificada durante a pesquisa e decorre de cautela adotada pela comunidade internacional em relação a determinados materiais que possuem aquilo que se chama de uso dual (*dual-use*), isto é, por conta de suas características especiais, podem ser usados também em importantes aplicações militares. Esse é o caso da fibra de carbono desejada pela Marinha do Brasil.

Conforme abordado no Capítulo 3, organizações internacionais importantes, tais como a Agência Internacional de Energia Atômica, (IAEA), o *Nuclear Suppliers Group* (NSG) e o *Wassenaar Arrangement*, têm firmado tratados com Estados visando coibir o comércio indiscriminado e sem controle dos materiais de uso dual. O Brasil é signatário de alguns tratados, como o Tratado de Não Proliferação Nuclear (TNP) e, por conta disso, comprometeu-se a apoiar o acompanhamento internacional sobre a transferência ou exportação de materiais, equipamentos, tecnologia ou *software* que possam ser utilizados com outros fins (*dual-use*), não pacíficos.

Esses organismos elaboram listas de acompanhamento ou controle.

¹⁵ Informação obtida em entrevista com o Coordenador de Separação Isotópica do CTMSP, Capitão-de-Fragata André Luis Ferreira Marques.

¹⁶ Como resposta ao pedido de importação feito pela Marinha do Brasil ao fabricante Toho Tenax America, o Departamento de Comércio dos Estados Unidos, em 29 de março de 2007, por meio de seu *Bureau of Industry and Security*, solicitou que o referido fabricante negasse o pedido com base em potenciais riscos à segurança nacional americana (*Application Control n.º. Z702383, United States Department of Commerce - Bureau of Commerce and Security, Washington, DC, 2007*).

A Lista de Controle da Agência Internacional de Energia Atômica (*List of nuclear-related dual-use equipment, materials, software, and related technology*) estabelece diretamente como material a ser controlado, dentre os utilizados nas partes rotativas das centrífugas, **os materiais filamentosos ou fibrosos de carbono** adequados para o uso em compósitos estruturais e que tenham um módulo específico de $12,7 \times 10^6$ m ou maior e uma resistência específica à tensão de $23,5 \times 10^4$ m ou maior (IAEA, 2005).

A Lista de Controle da *Wassenaar Arrangement (List of Dual-Use Goods and Technologies)* inclui, entre os materiais avançados de categoria 1 (sensíveis), a fibra de carbono componente de compósitos estruturais (WASSENAAR ARRANGEMENT, 2005).

O mercado internacional de fibras de carbono experimenta um grande incremento, atualmente, sendo previstas taxas de crescimento anuais de 15 por cento. A pesquisa realizada indica que essa vitalidade é decorrente de quatro fatores principais:

- Mercado de aviação;
- Energia alternativa (eólica);
- Exploração de petróleo em águas profundas; e
- Reforços estruturais na construção civil.

Os quatro setores acima foram responsáveis por anúncios de expansão dos principais produtores mundiais de PAN e fibra de carbono no mundo.

Esses setores também possuem uma grande relevância atualmente no Brasil, conforme abordado no Capítulo 3, referente à revisão da literatura e podem ser um importante incentivo para que a tecnologia de PAN e fibra de carbono seja objeto de comercialização visando conquistar esses possíveis nichos de mercado presentemente atendidos apenas por fornecedores externos e sob condições muito rígidas (verificação de *end-user*).

De fato, verificou-se, durante as entrevistas realizadas, especificamente com o Coordenador de Separação Isotópica do CTMSP, que grandes grupos empresariais brasileiros, como VICUNHA e PETROBRAS, estão interessados nos resultados obtidos no projeto e no estabelecimento de acordos para comercialização.

Trata-se de um mercado muito concentrado, em escala mundial, em que sete grandes corporações predominam: Toray, Toho-Tenax, Mitsubishi Rayon, Hexcel, Zoltek, Cytec e SGL (RASMUSSEN, 2008). O Japão detém cerca de 70 por cento do mercado mundial de fibra de carbono. Há, ainda, uma tendência constatada de verticalização na produção, ou seja, quem produz a PAN, produz ainda a fibra de carbono (mesmo que em sítios industriais diferentes) e também compósitos especiais de fibra de carbono (com a junção de uma resina, normalmente uma matriz epóxi, à fibra de carbono). Isso agrega maior valor comercial ao produto.

As características das fibras de carbono produzidas por essas corporações variam conforme as aplicações a que se destinam. Entretanto, seus processos tecnológicos são invariavelmente resguardados e tratados com um severo sigilo comercial.

Os Estados Unidos têm desenvolvido ações governamentais, nos últimos anos, visando diminuir uma incômoda dependência externa de PAN e fibra de carbono. As normas DFARS, comentadas no Capítulo 3, têm obtido sucesso em seu objetivo de fomentar a indústria nacional americana nesses insumos.

As fibras de carbono comentadas neste trabalho são aquelas que possuem características peculiares de alto desempenho.

As fibras de alto desempenho são aquelas projetadas para usos específicos que requerem rigidez, leveza e resistência excepcionais (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2005).

Entre as fibras de alto desempenho, destaca-se a fibra de carbono, a qual pode ser conjugada a outros polímeros (como resina epóxi) e formar um material reforçado (compósito). São utilizadas em aplicações diversas que vão da indústria de recreação ou automobilística a aplicações militares e aeroespaciais. Apenas para ilustrar, compósitos reforçados de fibra de carbono possuem resistência específica maior que a do aço, com um peso menor, conforme apresentado na TAB. 1, no Capítulo 3.

A fibra de carbono pode ser obtida a partir de três tipos de matérias-primas, ou precursores: piche, poliácridonitrila (PAN) e raion. Essa fibra possuirá

microestrutura e propriedades variando, conforme o tipo de precursor adotado e processo escolhido.

A fibra de carbono obtida a partir da PAN é a mais comum atualmente no cenário mundial, dominando cerca de 90% do mercado de fibra. Ela é aplicada em produtos que requeiram, como fator-chave, uma resistência específica grande, conjugada à leveza do material. Adicionalmente, possui como vantagem competitiva, além de suas características de desempenho, o fato de ser mais barata do que a fibra obtida a partir do piche e do raion (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2005).

Além das aplicações anteriormente comentadas, a utilização da fibra de carbono também se dá nos rotores de ultracentrífugas, em que uma resistência específica de alto nível, combinada a uma maior velocidade do rotor e a uma menor densidade do material, constitui fator-crítico que possibilita uma maior eficiência na separação isotópica.

A URENCO, uma grande empresa do segmento de energia nuclear, atribui ao desenvolvimento das fibras de alto desempenho o sucesso obtido nas modificações incrementais em suas centrífugas (seis gerações), especialmente em seu comprimento e velocidade de rotor (UPSON, 2001).

A USEC, outra grande empresa da área nuclear, anunciou, em 2007, que adotará a fibra de carbono em sua nova planta americana de enriquecimento de urânio (método de ultracentrifugação, similar ao da Marinha do Brasil). Para tal, contratou a Hexcel Corporation, uma das grandes produtoras mundiais de fibra de carbono a partir da PAN, a fim de fornecer a fibra necessária para mais de 11.500 rotores.

A decisão tomada pelo CTMSP, na década de 1990, de utilizar em sua produção de ultracentrífugas a fibra de carbono obtida a partir da PAN revelou-se, posteriormente, acertada e, até certo ponto, visionária. Os anúncios recentes de fabricantes, como a URENCO e USEC, que seguiram, ou estão em vias de seguir essa rota tecnológica, ajudam a corroborar essa assertiva.

Essa importante tomada de decisão, bem como a origem do projeto de pesquisa cooperativa, foi objeto de aplicação de um instrumento de entrevista semi-

estruturada, submetido ao Coordenador de Sistemas de Separação Isotópica do CTMSP. Foi aplicado o seguinte formulário ao entrevistado:

1. Por que o CTMSP se decidiu pela fibra de carbono de PAN?
2. Quais aspectos técnicos específicos levaram à procura da nacionalização da fibra de carbono de alto desempenho?
3. Como se encontrava o CTMSP em termos de capacitação de pessoal?
4. Em que medida aspectos relacionados à capacidade instalada (laboratórios e maquinário) do CTMSP influenciaram a decisão de se buscar o desenvolvimento da fibra de carbono?
5. Como foi definido e estruturado o acordo que culminou no projeto de pesquisa cooperativa?
6. Como foi determinada a divisão de tarefas do projeto?
7. Como se deu a escolha da RADICIFIBRAS como parceira necessária do CTMSP no projeto? E quanto aos demais participantes?
8. Os resultados alcançados foram considerados satisfatórios?

Para o entrevistado André Luis F. Marques¹⁷, Coordenador de Separação Isotópica do Centro Tecnológico da Marinha, a decisão de se utilizar a fibra de carbono foi técnica, pois em elementos girantes a resistência mecânica à rotação (aceleração centrífuga) relaciona-se com o fator $\sqrt{E/\rho}$, isto é, tensão em relação ao peso específico. A fibra de carbono possui esse fator da ordem 3, sendo duas vezes melhor que ligas de alumínio. Além disso, com o acabamento superficial adequado (*sizing*), possui grande resistência à corrosão.

Outros fatores também pesaram como estudos que indicavam as boas propriedades desse tipo de fibra, sua disponibilidade comercial à época (início da década de 1990) e preço, comparativamente às demais formulações/precursores.

A nacionalização da fibra de carbono foi uma decorrência de um cenário interno e externo peculiar: desenvolvimento de nova geração de ultracentrífugas, contrato de fornecimento com a INB e restrições à importação da fibra.

¹⁷ O Comandante André L. F. Marques é engenheiro naval, pós graduado em engenharia nuclear pelo *Massachusetts Institute of Technology* e Coordenador de Separação Isotópica do Centro Tecnológico da Marinha. Entrevista realizada em 23 jun. 2008, no CTMSP.

O CTMSP dispunha de pessoal com competências específicas em materiais. Segundo o entrevistado, a capacitação de pessoal do CTMSP concentrou-se no manuseio e preparo de diversos tipos de materiais (orgânicos e inorgânicos), além de possuir profissionais de diversos espectros. Quanto às suas instalações e maquinário, havia boa capacidade instalada, laboratórios ligados à ciência dos materiais bem equipados e com possibilidade de adaptação ao processo de produção de fibra. A disponibilidade de fibra de carbono importada também foi fator importante, pois tornaria possível engenharia reversa e testes comparativos.

O entrevistado acentuou, entretanto, que não se dispunha, então, de todo o maquinário necessário à empreitada, mesmo em nível laboratorial. Houve reformas de laboratórios, atualização de equipamentos e, visando atender pequenas produções de protótipos, foram desenvolvidos, no mercado nacional, os principais itens, tais como: fornos, sistemas de controle e instrumentos.

A escolha da RADICIFIBRAS (sucessora das operações da Rhodia-Ster Fibras Ltda) como parceira deu-se por ser essa empresa a única no país a dispor de uma unidade química apta à obtenção de polímero e fibra de PAN em escala semi-industrial, conforme atestado emitido pela Associação Brasileira dos Produtores de Fibras Acrílicas e Sintéticas – ABRAFAS. A referida empresa dispunha, além da planta industrial, de pessoal especializado para serviços similares e de *know-how* na produção industrial de fibras acrílicas.

Houve um grande interesse por parte da Marinha em ter a participação dessa empresa no projeto de pesquisa cooperativa pelos motivos apresentados acima. Essa cooperação poderia encurtar o tempo investido e ainda os custos associados a esse complexo desenvolvimento. Diversos contatos e gestões entre as partes foram feitas, objetivando motivar a RADICIFIBRAS a participar, ainda que não houvesse perspectivas, no curto prazo, de cunho mercantil, até por se tratar de hipótese de pesquisa aplicada, de difícil e complexa realização.

Os demais parceiros do projeto (IF-USP e IQ-UNICAMP) foram escolhidos por uma questão de habilidades/competências em determinadas áreas essenciais ao desenvolvimento da pesquisa e com atribuições bem delineadas no instrumento do

Plano de Trabalho proposto. A FINEP trouxe à iniciativa um componente essencial (e escasso) a esse tipo de empreendimento em nosso país: o capital.

O acordo firmado entre os participantes foi assinado em 03 de setembro de 2003, sob o número FINEP 01.03.0356, tendo como fonte o Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FNDCT/CT – AERO). Sua vigência estendeu-se até 03 de dezembro de 2006.

Segundo o coordenador geral do projeto, este atingiu seus objetivos ao possibilitar a obtenção de formulações de PAN e fibra de carbono com características especiais próximas às observadas no elemento de controle ou referência (fibra importada).

De acordo com o entrevistado, os resultados foram considerados muito satisfatórios, pois duas formulações desenvolvidas atingiram os valores de referência de tensão de ruptura e chegaram muito próximas ao resultado almejado de módulo de elasticidade. Há a possibilidade concreta de, com novos testes e pequenos investimentos, melhorar-se, em pouco tempo, a formulação do produto, otimizando suas propriedades físicas e químicas, tornando-o pré-comercial.

Além da entrevista, cujo formulário foi anteriormente apresentado, foram feitas entrevistas, não estruturadas, com os gerentes do projeto. Tais entrevistas visaram obter dados a respeito da origem do projeto, seu desenvolvimento e resultados.

A realização dessas entrevistas e a utilização dessa técnica também guardam pertinência com o tipo de estudo realizado, de caráter exploratório, conforme apresentado no Capítulo 4, referente à metodologia.

Uma dificuldade que desde cedo se vislumbrou foi a questão do sigilo que reveste aplicações desenvolvidas por organizações militares. O acesso às informações é difícil. Boa parte dos documentos tem alguma classificação de sigilo, não sendo, em sua maioria, de caráter ostensivo.

Além disso, existe um conhecimento de difícil mensuração, não escrito, tácito, muito presente em instituições de pesquisa, como é o caso do CTMSP. Assim, a realização de entrevistas não estruturadas com pessoas-chaves mostrou-se bastante interessante.

Outro ponto abordado foi quanto aos objetivos da pesquisa. Procurou-se destacar sempre que não havia interesse, de parte deste pesquisador, na divulgação de dados referentes às formulações de fibra de carbono, técnicas experimentais em teste e aspectos específicos de caracterização do material/ processo.

O foco principal seria a origem do projeto, desenvolvimento e seus resultados práticos, ou seja, o enfoque foi assumido como estando relacionado à gestão do projeto de pesquisa cooperativa, utilizando-se o projeto liderado pelo CTMSP para análise e exemplificação desse modelo de pesquisa.

Um aspecto importante atenuador desse cenário foi o fato da Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) ter sido a instituição que fomentou, sob o aspecto financeiro, a realização da pesquisa cooperativa. Isso levou à elaboração de documentos referentes à evolução do projeto, os quais puderam ser analisados, por serem de caráter ostensivo, público.

Foram entrevistados para a realização do instrumento da pesquisa, os seguintes profissionais:

Nome	Tipo de atividade	Local	e-mail e telefone
André L. F. Marques	Coordenador	CTMSP	(11) 3817-7141 aferreiramarques@uol.com.br
Eric Olifiers	Gerente de Projeto	CTMSP	(11) 3817-7540 olifiers@ctmsp.mar.mil.br
Daniel Kersting	Gerente de Subprojeto	CTMSP e RADICIFIBRAS	(11) 3817-7204 kersting@ctmsp.mar.mil.br

Para a produção da fibra de carbono que atenda aos requisitos da fabricação de ultracentrífugas segue-se um complexo processo, o qual foi delineado no Capítulo 3. A produção é dividida em duas etapas:

1. Obtenção da fibra precursora;
2. Obtenção da fibra de carbono.

Duas linhas de produção são, normalmente, ativadas. Uma referente ao precursor e outra para a obtenção da fibra. Os grandes produtores mundiais de fibra

de carbono possuem plantas industriais distintas, não necessariamente no mesmo local, para a produção do precursor e da fibra.

No arranjo implementado pelo projeto de pesquisa liderado pelo CTMSP, a obtenção de fibra de PAN foi definida para ser realizada nas instalações da RADICIFIBRAS, no município de São José dos Campos, em São Paulo. Essa empresa possuía instalações fabris disponíveis e passíveis de adaptação para atender ao ciclo de desenvolvimento da PAN.

A parte de obtenção da fibra de carbono (a partir da PAN) foi realizada nas instalações laboratoriais do Centro Tecnológico da Marinha, no campus da USP, em São Paulo. Essas instalações foram adaptadas para as diversas etapas do processo. A oxidação e carbonização da fibra (aquilo que se chama de “queima” por ocorrer em fornos especiais), etapa complexa e delicada do processo, foram realizadas nessas instalações. Os resultados obtidos foram sendo medidos e seus dados realimentados no sistema, entre uma etapa e outra, obtendo-se diferentes formulações.

Cada etapa do desenvolvimento da fibra de carbono seguiu uma ordem lógica de eventos, destinada a fornecer subsídios técnicos aos eventos anteriores e reiniciar o ciclo de desenvolvimento e otimização.

Na FIG. 3 é apresentado um diagrama de ações do projeto:

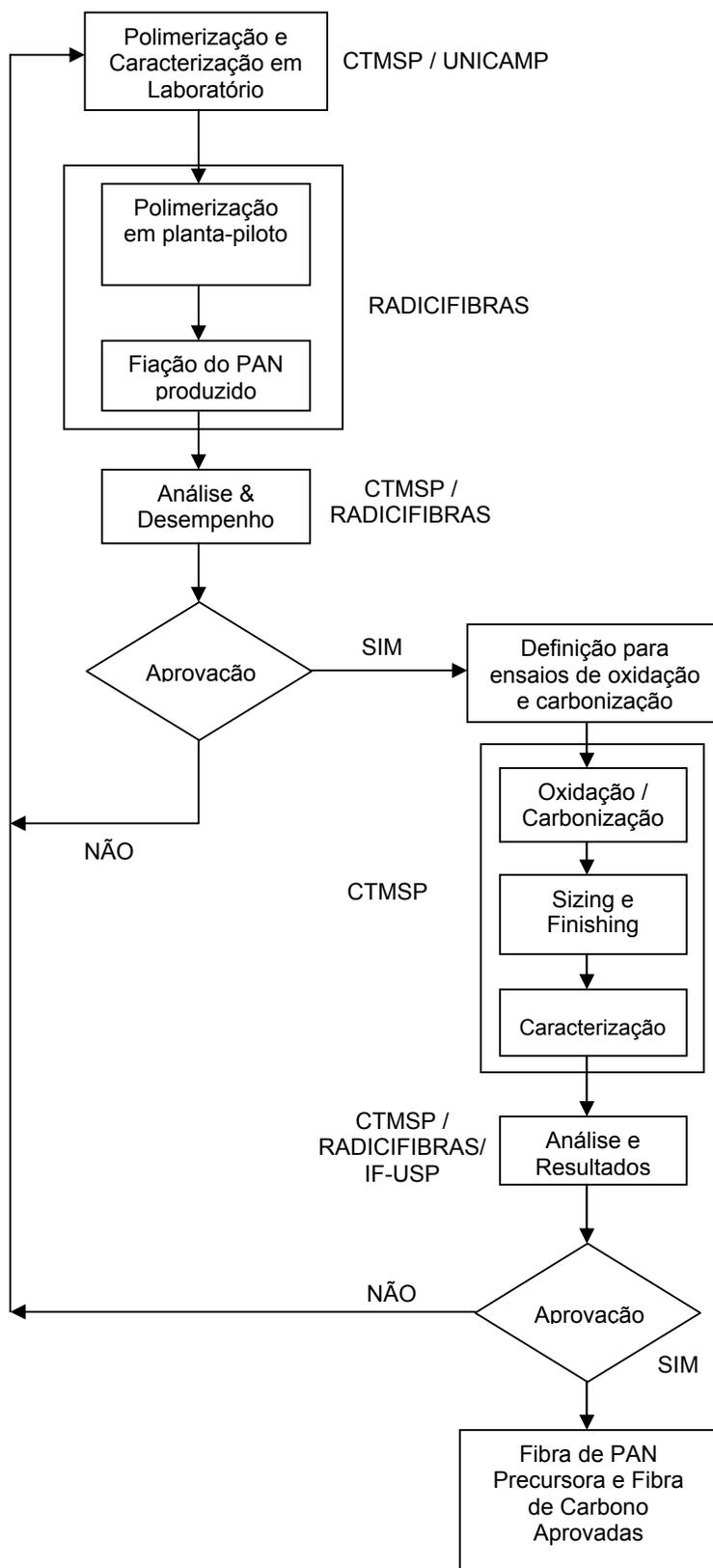


FIGURA 3: Diagrama de ações do projeto de pesquisa cooperativa

Verificou-se da análise dos documentos técnicos do projeto que o objetivo global foi definido como sendo o desenvolvimento do processo de fabricação de uma fibra de carbono de alto desempenho para aplicação estrutural. Para a consecução desse objetivo, o projeto foi dividido em fases ou etapas, sendo interessante citar:

- Polimerização do polímero de poliacrilonitrila;
- Fiação do polímero de poliacrilonitrila;
- Pré-oxidação, oxidação e carbonização do fio de poliacrilonitrila; e
- Tratamento superficial da fibra de carbono.

Os atores do projeto, isto é, as instituições que concordaram em participar do projeto, estão indicadas na FIG.3, a qual apresenta também responsabilidades atribuídas na pesquisa. Os participantes são:

- Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo (CTMSP);
- RADICIFIBRAS S.A.;
- Instituto de Física da Universidade de São Paulo (IF-USP);
- Instituto de Química da Universidade de Campinas (IQ-UNICAMP).

Quanto à metodologia adotada como base para o desenvolvimento, foi adquirido um fio importado de poliacrilonitrila para ser utilizado como elemento de referência ou controle. Este fio, utilizado comercialmente como precursor da fibra de carbono de alta resistência para aplicação estrutural, foi caracterizado para a realização da engenharia reversa do produto.

Logo, todas as propriedades objetivadas no desenvolvimento da fibra de carbono nacional estão baseadas nas características deste fio de referência, listadas na TAB. 7.

TABELA 7 - Propriedades da Fibra de Referência

Ensaio	Tenacidade, g/tex ¹⁸ (Precursor)	Alongamento% (Precursor)	Tensão de Ruptura, GPa (Fibra de Carbono)	Módulo de Elasticidade, GPa (Fibra de Carbono)
Referência	57,0	19	2,3 – 3,1	210 - 230

Fonte: Relatório Final de Atividades 7.1, 7.2 e 7.6 - Projeto FINEP-FIBRCARBONO – CTMSP. Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo, 2007.

¹⁸ A tenacidade, medida em g/tex, indica a força necessária em gramas para quebrar uma mecha de fibras.

O primeiro passo do projeto foi a caracterização da fibra de referência. Foi uma atividade crucial, essencial para o esforço de engenharia reversa, pois possibilitou a determinação de parâmetros iniciais para a produção em laboratório e bancada do polímero de PAN. Essa etapa foi realizada em instalação laboratorial para testes exploratórios de bancada nas dependências do Instituto de Química da UNICAMP, nos quais também se obteve a definição técnica do polímero inicial (acrilonitrila).

No passo seguinte, o polímero de PAN produzido em bancada foi caracterizado e comparado ao polímero de referência. Houve a definição de uma primeira formulação e passou-se a uma fase piloto de polimerização.

A polimerização foi, a seguir, ajustada em seus parâmetros para a mudança de uma escala de bancada para a de planta piloto visando não interferir nas propriedades obtidas em laboratório. Nos relatórios técnicos faz-se uma ressalva, nessa etapa: inobstante os ensaios realizados e compatibilidade física e química com o polímero de referência, o teste final do polímero obtido deveria ser feito com a fiação e posterior carbonização.

Outra indicação de dificuldade técnica relatada foi o processo de fiação do polímero. Havia a expectativa dos técnicos, confirmada, quanto à dificuldade tecnológica de obtenção da composição do polímero e seu processo de polimerização. Entretanto, a fiação do polímero mostrou-se bastante complicada no processo de desenvolvimento da fibra de carbono, o que não havia sido estimado.

Nessa etapa de fiação do polímero, alguns esclarecimentos quanto à infraestrutura utilizada são pertinentes:

- embora dispusessem de planta piloto de polimerização e fiação (consideradas únicas na América do Sul e estimadas em mais de R\$5.500.00,00), as instalações da RADICIFIBRAS tiveram que ser adaptadas/modificadas para operacionalização;
- os recursos da FINEP foram utilizados para deixar a planta em condições operativas;
- o comissionamento da planta piloto de fiação foi feito por meio de ensaios realizados com polímero industrial da própria empresa.

Na operação da planta de fiação optou-se por refiar o polímero de referência para se verificar a influência da fiação sobre o polímero, sendo comparadas as propriedades do fio obtido com o fio de referência. Observou-se, nesse momento, a importância do processo de fiação sobre as propriedades do fio de PAN obtido. A partir desse ponto, os parâmetros da planta de fiação foram ajustados, sendo realizadas diversas campanhas de fiação, cujo objetivo era melhorar o fio obtido.

Na etapa subsequente, os fios de melhores propriedades foram encaminhados ao CTMSP para caracterização e “queima” (oxidação e carbonização). Diversos tipos de fios passaram por carbonização, sendo selecionados os melhores fios precursores, os quais, então, retroalimentavam (*feedback*) o processo de fiação. Com esses dados, a equipe de fiação pode definir quais parâmetros de fiação mais influenciaram a fibra de carbono e, assim, otimizar o processo.

O tratamento superficial da fibra de carbono é dividido em duas fases: ativação (oxidativa ou não) denominada *finishing* e outro tratamento executado em seguida, denominado *sizing*, no qual é adicionada uma resina à superfície de fibra ativada para permitir que a fibra seja manuseada e para manter a atividade superficial. Em ambos os processos foram obtidos os resultados esperados em amostras laboratoriais. Entretanto, os testes não foram conclusivos quando aplicados na planta piloto de carbonização do CTMSP.

Tal ocorrência foi atribuída pela gerência do projeto à falta de tempo hábil para conclusão dos ensaios já que a equipe desenvolvedora do processo de carbonização é a mesma encarregada do processo de tratamento superficial.

Houve entendimento da coordenação/ gerência do projeto de que como esse processo de tratamento superficial havia sido realizado, com sucesso, em escala laboratorial, sua implementação na escala piloto do CTMSP seria uma questão de tempo e pequenos ajustes¹⁹. Decidiu-se, então, priorizar o desenvolvimento da fibra precursora de PAN e da fibra de carbono (CENTRO

¹⁹ De acordo com informação da gerência do projeto, os estudos continuam, tendo sido, inclusive, obtidas amostras de *sizing* utilizadas em fibras de carbono comerciais, as quais estão sendo objeto de ensaios no CTMSP.

TECNOLÓGICO DA MARINHA EM SÃO PAULO, 2007).

Finalizando as etapas do processo de desenvolvimento, houve a fabricação de compósitos de fibra de carbono. Tal atividade foi desenvolvida com o propósito de caracterizar o produto obtido e fornecer dados aos processos de polimerização, fiação e carbonização. A caracterização foi realizada através de ensaios de tração interlaminar de compósitos e tração em filamentos.

No que se refere aos resultados obtidos, cabe esclarecer que, após o término da vigência do acordo com a FINEP (em dezembro de 2006), as instituições CTMSP e RADICIFIBRAS continuaram a parceria e avançaram nos resultados, o que também será abordado neste trabalho.

Neste ponto, entretanto, serão relatados os resultados obtidos e apresentados quando da prestação de contas dos recursos financeiros recebidos da FINEP.

Houve a obtenção de um processo de produção de fibra de carbono com propriedades estruturais básicas. Dentro do planejamento inicial, quase todos os objetivos foram alcançados e muitos foram, no entender da gerência do projeto, além do esperado.

O desenvolvimento do processo de produção de fibra de carbono foi viabilizado ao final de quatro etapas completas de testes realizadas. Como resultado, foram obtidos produtos finais com características muito próximas às do padrão estabelecido inicialmente.

Os produtos (obtidos a partir dos polímeros formulados A0 e A1) foram produzidos e testados em duas etapas polimerização-fiação na RADICIFIBRAS, resultando em duas diferentes grades de fibra de carbono, a saber: um tipo de fibra de carbono com tensão de ruptura próxima à apresentada pelo padrão (~3,1GPa), e um segundo tipo de fibra com 90% do módulo de elasticidade apresentado pelo padrão (~180GPa). Na TAB. 8 são apresentados os dados obtidos.

TABELA 8 - Comparação das melhores fibras desenvolvidas

Ensaio	Mês/ Ano	Receita de Polímero	Tenacidade, g/tex (precursor)	Alongamento,% (precursor)	Tensão de Ruptura, GPa (fibra de carbono)	Módulo de Elasticidade, GPa (fibra de carbono)
Referência	-	-	57,0	19	2,3 – 3,1	210 - 230
101 / 06	Set / 06	A – 1	50,3	22,4	2,6	181
106 / 06	Set / 06	A - 0	55,4	18,8	3,1	168

Fonte: adaptado de Relatório Final de Atividades 7.1, 7.2 e 7.6 - Projeto FINEP –FIBRCARBONO – CTMSP. Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo, 2007.

Quanto aos recursos, financeiros e não-financeiros, aplicados no projeto de pesquisa cooperativa, foi estabelecido o seguinte arranjo:

- **FINEP:** financiou parcela importante do empreendimento, aportando recursos ao projeto da ordem de R\$ 2.670.754,80;
- **CTMSP:** líder do empreendimento e conveniente do acordo com a FINEP, participou com recursos não financeiros, dados em contrapartida aos recursos da FINEP, no valor de R\$ 5.969.277,00, sob a forma de bens materiais e serviços (homem/hora e hora/máquina);
- **RADICIFIBRAS:** participante-chave do projeto e interveniente do acordo com a FINEP, participou com recursos não financeiros, dados em contrapartida aos recursos da FINEP, no valor de R\$ 5.500.000,00, sob a forma de bens materiais e serviços (homem/hora e hora/máquina);
- **Instituto de Química da UNICAMP:** disponibilização de laboratório e pessoal especializado para testes;
- **Instituto de Física da USP:** disponibilização de laboratório e pessoal especializado para testes.

Com referência aos recursos financeiros aportados ao projeto de pesquisa cooperativa, mediante o convênio celebrado entre as partes e a FINEP, os mesmos foram liberados por meio de créditos no Sistema Integrado de Administração Financeira (SIAFI), em nome do CTMSP, órgão da Administração Pública direta, o qual os geriu de acordo com as normas de Direito Público vigentes no país.

Na TAB. 9 as liberações de recursos previstas são informadas e

confrontadas com as efetivamente realizadas. Há divergências significativas nesse cronograma, o que ocasionou transtornos aos gestores do projeto na realização de suas aquisições/ serviços e, por conseguinte, em seus prazos e metas.

TABELA 9 – Desembolso de recursos (cronograma previsto e efetivado)

Parcelas	1ª Parcela	2ª Parcela	3ª Parcela	4ª Parcela	TOTAL
Previsto	OUT2003	ABR2004	OUT2004	ABR2005	
Valores	R\$ 787.885,00	R\$ 1.097.385,00	R\$ 658.105,00	R\$ 127.379,80	R\$ 2.670.754,80
Efetivado	OUT2003 R\$ 550.000,00 MAI2004 R\$237.000,00	OUT2004 R\$ 617.501,70 OUT2005 R\$ 479.883,30	OUT2004 R\$ 94.983,10 OUT2005 R\$ 563.121,90	MAI2006 R\$ 127.379,80	R\$ 2.670.754,80

Fonte: Relatório Técnico Final - Projeto FINEP – FIBRCARBONO – CTMSP. Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo, 2007.

Também pode ser observado que a maior parte dos recursos financeiros do projeto foi disponibilizada em períodos próximos ao encerramento de ano financeiro (meses de outubro de 2003, 2004 e 2005), o que, em se tratando de regras de Administração Pública, gerou transtornos na execução das despesas, devido ao fato dos recursos (disponíveis na forma de créditos no SIAFI) não poderem ser transferidos de um ano para o outro (Princípio da Anualidade Orçamentária), ou seja, tinham que ser aplicados no curto espaço temporal entre outubro e dezembro.

Adicionalmente, o curto espaço de tempo para realização de despesas também dificulta a realização de licitações para aquisições de bens²⁰ e contratações de serviço. O CTMSP é obrigado a seguir as regras previstas no regime jurídico de Licitações Públicas (Lei nº. 8.666/93 e demais normas pertinentes ao assunto).

Após o término do convênio com a FINEP, houve a proposição de um novo projeto junto àquela agência de fomento visando obtenção de financiamento para a otimização das características de fibra de carbono obtidas.

A continuação do projeto demandaria poucos investimentos, uma vez que

²⁰ Embora os recursos oriundos da CAPES, FINEP e CNPq destinados à aquisição de bens voltados à pesquisa e desenvolvimento tecnológico sejam dispensados de licitação (art. 24, inciso XXI, da Lei nº. 8.666/93), há a necessidade de se fazer um processo de dispensa de licitação, o que também demanda tempo.

os meios necessários ao desenvolvimento estavam operativos e o pessoal capacitado, sendo necessários apenas alguns equipamentos, serviços e insumos.

Entretanto, os recursos esperados não foram recebidos, embora tenha havido manifestação de intenção da PETROBRAS em financiar o projeto, conjuntamente com a FINEP.

Quanto à intenção de participação da PETROBRAS no projeto, cabe acentuar que a mesma não foi efetivada devido a divergências na divisão dos resultados/formulações obtidos e, também, na continuação no projeto da RADICIFIBRAS.

O CTMSP, líder do projeto de pesquisa cooperativa, fiel à relação de confiança e respeito mútuo implantados entre todos os parceiros, discordou da inclusão de novos parceiros que alterasse o *status quo* da parceria.

Dessa maneira, desde janeiro de 2007, valendo-se de recursos próprios, as instituições continuaram os trabalhos de pesquisa e desenvolvimento da fibra precursora de PAN para a fibra de carbono nacional.

Nesse período, novas formulações de polímero precursor de fibra de carbono foram desenvolvidas e os resultados superaram os anteriormente obtidos.

De fato, os resultados das novas formulações excederam as expectativas e se aproximaram de uma escala de propriedades que permite a comercialização da fibra. O produto obtido foi descrito pelos responsáveis técnicos como tendo características muito próximas às de fibras de carbono comerciais, como, por exemplo, a T300, da Toray Carbon Fibers America²¹, amplamente comercializada.

Presentemente, discute-se um acordo entre o CTMSP e a RADICIFIBRAS que resguarde a tecnologia e o processo desenvolvidos, além de direitos de propriedade intelectual.

Esse acordo visa resguardar o conhecimento alcançado, possíveis patentes geradas em decorrência da pesquisa e distribuição de rendas oriundas da comercialização dos resultados do projeto de pesquisa de fibra de carbono.

Há, ainda, o interesse, manifestado em 2008, do grupo VICUNHA na

²¹ Ficha técnica da fibra T300 disponível em <[http:// www.torayusa.com/cfa/pdfs/T300DataSheet.pdf](http://www.torayusa.com/cfa/pdfs/T300DataSheet.pdf)>. Acesso em 09 jul.2008.

formação de uma nova parceria com a RADICIFIBRAS e o CTMSP para a produção em escala industrial e comercialização da fibra de carbono obtida.

Para o CTMSP, a formação dessa parceria da RADICIFIBRAS com a VICUNHA significa a possibilidade de concretizar o desejo de obter no mercado nacional o insumo de que precisa para suas ultracentrífugas. Foi justamente a carência da fibra que motivou toda a empreitada que culminou no projeto de pesquisa cooperativa de fibra de carbono.

Como auxílio à análise do projeto de pesquisa cooperativa para desenvolvimento de fibra de carbono e identificação das práticas de sucesso foi, também, utilizada, com pequenas adaptações, a metodologia de matriz ou marco lógico (também conhecida como *Logical Frame*), muito utilizada na avaliação de projetos por agências internacionais e pelo Tribunal de Contas da União (TCU)²².

Na avaliação do TCU, a ferramenta do Marco Lógico propicia uma análise detalhada do programa objeto de uma auditoria (TRIBUNAL DE CONTAS DA UNIÃO, 2001).

Normalmente, para os projetos ou programas subsidiados por agências internacionais, o marco lógico do projeto já existe e o trabalho do analista consiste em verificar as informações constantes da matriz e analisá-las, com a colaboração dos gestores responsáveis.

No caso do projeto de pesquisa liderado pelo CTMSP não houve a elaboração prévia de uma matriz de marco lógico. Assim, a elaboração de uma matriz neste trabalho visa acrescer à avaliação do projeto, feita através de coleta de informações sobre o planejamento e desempenho do mesmo, apresentada neste capítulo, uma seleção das melhores práticas identificadas.

Na Tab. 10 é apresentada a matriz para o projeto em análise neste trabalho.

²² O TCU adotou, em 2001, a metodologia do Marco Lógico, desenvolvida pelo Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID) e a institucionalizou como Técnica de Auditoria.

TABELA 10 – Marco Lógico do projeto de pesquisa cooperativa do CTMSP

DESCRIÇÃO	INDICADORES	MEIOS DE VERIFICAÇÃO	PRESSUPOSTOS
<p>✓ FINALIDADE: Tornar disponível, no país, fibra de carbono de características de alto desempenho</p>	Fornecedor qualificado para o fornecimento de fibra de carbono de PAN	Atestado da ABRAFAS – Associação Brasileira de Fabricantes de Fibras Acrílicas e Sintéticas	Desenvolvimento de mercado consumidor, no país, de fibra de carbono de PAN nacional para viabilizar investimento inicial
<p>✓ OBJETIVO: Obter o desenvolvimento tecnológico necessário à produção de fibra de carbono para aplicação em ultracentrífugas do Programa Nuclear da Marinha</p>	Propriedades mecânicas da fibra desenvolvida, principalmente quanto aos valores de referência desejados do módulo de elasticidade e tensão de ruptura	Ensaio mecânicos de tensão e deformação, através de corpo de prova	Captação de recursos adicionais necessários à finalização de pesquisas não concluídas para a otimização da fibra de carbono obtida
<p>✓ PRODUTOS: Fibra precursora de PAN e fibra de carbono nacional</p>	<ol style="list-style-type: none"> Operacionalização de unidade laboratorial e de bancada de polimerização com controle de parâmetros na UNICAMP; Implantação de controle de temperatura nos laboratórios de materiais orgânicos, ensaios químicos e metrologia do CTMSP; Operacionalização e automação da planta piloto de fiação e produção de PAN; Otimização da planta de produção de fibra de carbono do CTMSP; Aquisição de diversos equipamentos essenciais ao desenvolvimento da pesquisa, tais como: foto-espectômetro para análise de difração por RX, 	<ol style="list-style-type: none"> Relatório de visita; Relatório de visita; Análise de testes de produto; Análise de testes de produto; Relatórios de compras e licitações realizadas; Relatório de produção por equipe do projeto; Trabalhos científicos 	<ol style="list-style-type: none"> Obtenção de fibra importada para comparação e utilização como elemento de referência em engenharia reversa; Os recursos alocados ao projeto são distribuídos conforme programação acertada com a FINEP; Aquisições, no país e exterior, por licitações

DESCRIÇÃO	INDICADORES	MEIOS DE VERIFICAÇÃO	PRESSUPOSTOS
	<p>microscópios de varredura eletrônica, equipamento de análise termogravimétrica e por calorimetria diferencial, entre outros;</p> <p>6. Treinamento de operadores em plantas piloto de polimerização, fiação, oxidação e carbonização;</p> <p>7. Disseminação do conhecimento científico gerado, através de publicações técnico-científicas;</p> <p>8. Produção de novelos com PAN e fibra de carbono em escala laboratorial.</p>	<p>publicados (total de 15);</p> <p>8. Análise de testes de produto.</p>	<p>públicas, não atrasem acima de 30 dias o cronograma de compras do Plano de Trabalho;</p> <p>4. Atualização da planta de fiação da RADICIFIBRAS obtém autorização da FINEP.</p>
<p>ATIVIDADES:</p> <p>1. Consolidar o processo de obtenção do polímero acrílico e fibra precursora em laboratório e em escala piloto com controle de propriedades;</p> <p>2. Consolidar o processo de obtenção de fibra de carbono, a partir de fibra precursora importada;</p> <p>3. Desenvolver o processo de acabamento superficial da fibra de carbono, a partir do precursor importado;</p> <p>4. Desenvolver o processo de obtenção de fibra de carbono, a partir de precursor nacional;</p> <p>5. Consolidar o processo</p>	<p>1. Obtenção de produto em laboratório para ensaios iniciais de caracterização do polímero – 100%</p> <p>Obtenção de material em bancada para ensaios – 100%</p> <p>Ensaio de caracterização do polímero – 100%</p> <p>Início de ensaios de fiação – 100%</p> <p>Análise de resultados de caracterização e definição de parâmetros de ensaios – 100%</p> <p>2. Obtenção de fibra de carbono em piloto para ensaio de caracterização – 100%</p> <p>3. Execução de ensaios e geração de amostras para caracterização – 95%</p> <p>Análise de dados dos ensaios de caracterização – 95%</p> <p>4. Geração de fibra de polímero precursor em piloto (RADICIFIBRAS);</p>	<p>1. Relatório Técnico de Atividade I</p> <p>2. Relatório Técnico de Atividade II</p> <p>3. Relatório Técnico de Atividade III</p> <p>4. Relatório Técnico de Atividade IV</p> <p>5. Relatório Técnico de Atividade V</p> <p>6. Relatório Técnico de Atividade VI</p> <p>7. Relatório Final do Projeto</p>	

DESCRIÇÃO	INDICADORES	MEIOS DE VERIFICAÇÃO	PRESSUPOSTOS
de fabricação de fibra de carbono com acabamento superficial integrado em escala piloto, a partir do precursor nacional; 6. Compósitos; 7. Documentação.	<p>Geração de amostras de fibra de polímero em laboratório (fiação) – 100%</p> <p>Obtenção de fibra de carbono (piloto CTMSP) a partir de fibra precursora do piloto RADICIFIBRAS – 100%</p> <p>5. Início de testes piloto no CTMSP a partir da fibra precursora da instalação piloto na RADICIFIBRAS – 100%</p> <p>Obtenção de amostras de fibra de carbono na piloto do CTMSP para ensaios de caracterização – 100%</p> <p>6. Ensaio em amostras de precursor, com e sem acabamento superficial para caracterização – 100%</p> <p>7. Emissão de relatórios – 100%</p>		

Outros dois aspectos do projeto de pesquisa cooperativa foram observados e merecem uma abordagem neste trabalho: **beneficiários e impactos**.

Os beneficiários do projeto são:

- **Indústrias** de ponta do mercado nacional. Com pequenos investimentos, haverá a possibilidade de comercialização de fibra de carbono de alto desempenho para setores importantes da economia nacional;
- **Sociedade**, em geral, a qual receberá os benefícios desse desenvolvimento, na forma de empregos diretos e indiretos, além de aumento de arrecadação de tributos revertidos para o bem comum de todos;
- **Marinha do Brasil**, a qual terá conseguido obter o insumo essencial para suas ultracentrífugas.

Quanto aos impactos observados, pode-se listá-los, conforme abaixo:

Tecnológico: obtenção de *expertise* para a produção de fibra precursora e fibra de carbono de características especiais de alto desempenho, capacidade de aplicar o conhecimento obtido de fiação e polimerização para a otimização de outras fibras acrílicas industriais no mercado nacional e possibilidade, em médio prazo, de fornecimento, no mercado nacional, de um insumo de alto valor agregado (compósitos de fibra de carbono) e de grande relevância estratégica para setores industriais importantes, como:

- Recreação;
- Indústria automobilística;
- Militares e aeroespaciais;
- Construção civil;
- Energia alternativa;
- Exploração de petróleo e gás;
- Biomédica;
- Ultracentrífugas nucleares.

Econômico: com as restrições de mercado da fibra e o grande crescimento em sua procura, as importações se tornaram escassas e dispendiosas. O Brasil dispõe de uma indústria de aviação civil, petrolífera e de construção civil em grande expansão nesta década. Na indústria aeroespacial, os novos aviões são construídos em grande parte com materiais compósitos de fibra de carbono, vidro e aramida; na indústria petrolífera, há o desenvolvimento de *raisers* e amarras de fibra de carbono para prospecção em águas profundas, como é a característica dos novos campos recém descobertos na plataforma continental brasileira (“Camada Pré-Sal”); na construção civil, os reforços estruturais com fibra de carbono estão ampliando seu uso; na área de energia, há uma ampliação da utilização de energia eólica no país e a fibra de carbono é um insumo relevante nas novas pás e na área nuclear, com a retomada do Programa Nuclear Brasileiro, será necessário o domínio completo do ciclo de produção do combustível. Assim, do ponto de vista econômico, a fibra de carbono traz um impacto muito positivo ao país.

Social: o domínio da tecnologia de produção de fibra de carbono de características especiais poderá propiciar a criação de indústrias nacionais de fibra

de carbono, o que ocasionará um aumento considerável de empregos e tributos provenientes de vendas a indústrias de ponta (principalmente aviação e petróleo), aumentando a renda e o bem estar da população envolvida.

Ambiental: a fibra de carbono será utilizada como um insumo de ultracentrífugas, as quais são essenciais ao ciclo do combustível nuclear. A construção de novas usinas nucleares, já anunciadas, propiciará o fornecimento de uma energia essencialmente limpa quanto aos gases de efeito estufa.

Científico: publicação de artigos e trabalhos científicos ligados ao desenvolvimento de fibra de carbono:

1. Giovedi, C.; Machado L.D.B.; Augusto, M.; Pino, E. S.; Radino, P.; *Evaluation of the Mechanical Properties of Carbon Fiber after Electron Beam Irradiation*, Nuclear Instr. Meth. Res., 2005, 236, 526-530;
2. Catta-Preta, I.F.; Sakata, S. K.; Garcia, G.; Zimmermann, J. P.; Galembeck, F.; Giovedi, C.; *Thermal Behavior of Poluacrylonitrile Polymers Synthesized in Different Conditions and Comonomer Compositions*, submetido ao Journal Of Thermal Analysis and Calorimetry;
3. Giovedi, C.; Machado, L.D.B; Pino, E.S. ; Augusto, M.; Carvalho, O.; *Effects of Electron Beam Irradiation on Carbon Fiber Tensile Properties*. In: Proceedings of International Symposium on Utilization of Accelerators, 2005, Dubrovnik;
4. Machado, L.D.B.; Kodama, Y.; Pino, E.S.; Giovedi, C. *Research and Development on Electron Beam Curing of Composites in Brasil: Application Perspectives*. In: Proceedings of Consultants Meeting on Radiation Curing of Composites, 2005, São Paulo;
5. Machado, L.D.B.; Kodama, Y.; Pino, E.S.; Ruiz, C.S.B. *Properties and behavior of Composites Cured or Modified by UV/EB Radiation*. In: Proceedings of Consultants Meeting on Radiation Curing of Composites, 2005, São Paulo;
6. Sakata, S. K.; Giovedi, C.; Sanches, T.P.; Catta-Preta, I.F.; Paes, C.R.; Figueiredo Neto, A.M.; Garcia, G.; Zimmermann, J.P.; Galembeck, F.

- Effect of comonomer compositions on properties of polyacrylonitrile precursors.* In: 41st International Symposium on Macromolecules Proceedings, 2006. Rio de Janeiro;
7. Giovedi, C.; Catta-Preta, I.F.; Sakata, S.K.; Garcia, G.; Zimmermann, J.P.; Galembeck, F.; Efeito da Concentração de ácido itacônico no comportamento térmico de terpolímero de poliacrilonitrila. Anais do V Congresso Brasileiro de Análise Térmica e Calorimetria, 2006, p. 197-197, Poços de Caldas;
 8. Giovedi, C.; Catta-Preta, I.F.; Sakata, S.K.; Garcia, G.; Zimmermann, J.P.; Galembeck, F.; Comportamento térmico de polímeros de poliacrilonitrila sintetizados em diferentes condições. Anais do V Congresso Brasileiro de Análise Térmica e Calorimetria, 2006, p. 197-197, Poços de Caldas;
 9. Giovedi, C.; Aota, Y. A.; Caracterização de PAN por análise térmica. In: Anais do 13^o. Simpósio Internacional de Iniciação Científica da USP – SIICUSP, 2005, São Carlos;
 10. Marinucci, G.; Giovedi, C.; Determinação das frações volumétricas de compósitos de fibra de carbono e matriz epóxi por diferentes metodologias. XVI Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos Materiais – CBECIMAT, 2005, Porto Alegre;
 11. Giovedi, C.; Radino, P.; Matos, J.R.; Carvalho, A.A.S.; Ferreira, L.C.; Kawano, Y.; *Evaluation of different procedures to determine carbon fiber and matrix masses in composite materials.* II Congresso Pan-americano de Análise Técnica e Calorimetria, 2004, Poços de Caldas;
 12. Giovedi, C.; Machado, L.D.B.; Augusto, M.; Pino, E.S.; Radino, P.; *Evaluation of the mechanical properties of carbon fiber after electron beam irradiation.* 6th International Symposium on Ionizing Radiation and Polymer, 2004, Houffalize;
 13. Rossi, M.R. Caracterização dos efeitos da irradiação por feixe de elétrons nas propriedades de materiais compósitos de fibra de carbono. Bolsista CNPq/ PIBIC. Início: 2006;

14. Catta-Preta, I. F. Caracterização de polímeros e fibra de poliacrilonitrila (PAN) precursores de fibra de carbono. Bolsista CNPq/ PIBIC. Início: 2006;
15. Holster, A. Caracterização de materiais utilizados como sizing no processo de produção de fibra de carbono. Bolsista CNPq/ PIBIC. Início: 2006.

A utilização da matriz lógica propiciou a obtenção de uma visão de todo o projeto. Com isso, foi possível estabelecer quais foram as melhores práticas ou práticas de sucesso alcançadas:

- Ótimo trabalho de pesquisa para a verificação da possibilidade de desenvolvimento do processo de obtenção de fibra de carbono no país;
- Seleção dos melhores parceiros, escolhidos por competências técnicas específicas, entre segmentos da indústria, universidades e instituições de pesquisa;
- Divisão do processo de desenvolvimento em partes bem delimitadas, com responsabilidades bem distribuídas, levando-se em conta as afinidades/domínios científicos de cada parceiro do projeto;
- Descoberta de uma planta têxtil passível de adaptação ao ciclo de produção da fibra de PAN. Isso deu viabilidade ao empreendimento (redução de custos e tempo) e ainda possibilitou a utilização do *know how* da empresa em processos de outras fibras;
- Negociação para assegurar a participação da RADICIFIBRAS no projeto, ainda que esse não fosse o foco de seu negócio e sem perspectivas de benefícios econômicos, em curto prazo, por se tratar de pesquisa aplicada e em escala pré-comercial;
- Obtenção de apoio financeiro de uma agência de fomento, a FINEP, o que assegurou o capital indispensável para o início do projeto;
- Estabelecimento de uma relação muito estreita de confiança entre as partes, especialmente RADICIFIBRAS e CTMSP, que dividiram as responsabilidades de obtenção do polímero de PAN/fiação da fibra e oxidação/carbonização, em suas plantas, com uma relação de

cooperação e *feedback* muito bem realizadas e de grande proveito para a obtenção de resultados; uma vez que o sucesso de cada uma das etapas acima dependia de retroalimentação de informações para melhoria das características da fibra, a cooperação verificada traduziu-se na obtenção de resultados muito próximos dos valores de referência, como decorrência do trabalho em equipe;

- Manutenção da cooperação e dos investimentos, mesmo após o encerramento do convênio de recursos com a FINEP. Tal iniciativa possibilitou a obtenção, em menos de um ano (decorrer de 2007), após o encerramento do acordo inicial (em 03 dez. 2006), da formulação de fibra de carbono com as propriedades desejadas pelo projeto e com características comerciais;
- Negociações entre as partes para a divisão dos direitos de propriedade/patente do produto obtido. Com a obtenção de um processo de fibra de carbono que atenda aos requisitos comerciais, há interesse de grandes empresas no país (VICUNHA, PETROBRAS) de investir na industrialização do processo visando à oferta comercial dessa fibra no mercado nacional.

No capítulo que se segue serão analisados e discutidos os resultados verificados e apresentados neste tópico.

6. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A pesquisa foi dividida em três segmentos: rota tecnológica para obtenção de fibra de carbono de alto desempenho, análise do mercado de fibra de carbono, no país e exterior e projeto de pesquisa cooperativa para desenvolvimento nacional de fibra de carbono para uso em ultracentrífugas.

Referente ao primeiro segmento - processo tecnológico de obtenção de fibra de carbono: verificou-se que a fibra de carbono baseada na PAN é a comercialmente mais difundida, mais barata e com aplicação em projetos similares de ultracentrífugas. As empresas que detém essa tecnologia não a repassam (segredo comercial rígido). Essa rota passa pelo desenvolvimento do polímero precursor ou fibra de PAN, em uma instalação específica, onde é feita a fiação. Após a obtenção da PAN, ocorre a oxidação, carbonização e tratamento superficial da fibra de PAN até se obter a fibra de carbono com as características desejadas. Trata-se de um processo complexo.

Quanto ao segundo segmento da pesquisa - análise do mercado de fibra no país e exterior: há uma concentração da produção de fibra de carbono, a nível mundial, em sete grandes produtores. O mercado mundial está em expansão, com previsão de crescimentos anuais significativos (15 por cento até 2012), alavancados pelos setores de aviação, energia eólica, construção civil e exploração de petróleo em águas profundas. O comércio do tipo de fibra de carbono em análise neste trabalho sofre restrições de cunho governamental e político por se tratar de material de uso dual, objeto de tratados internacionais de salvaguardas. No Brasil, não há produção, mas há demanda para o produto.

No que se refere ao terceiro segmento, foi elaborada uma matriz de comparação das características teóricas de um projeto de pesquisa cooperativa e do Projeto de Desenvolvimento de Fibra de Carbono liderado pelo CTMSP:

Pesquisa Cooperativa	Projeto de Desenvolvimento de Fibra de Carbono Nacional para Ultracentrífugas
<p>Arranjo entre duas ou mais instituições para pesquisa e desenvolvimento tecnológico. Normalmente, constituído por ICT, empresa e universidade, as quais interagem, sob a liderança de um dos parceiros</p>	<p>Projeto voltado para o desenvolvimento de fibra de carbono</p> <p>Teve a participação de:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. ICT: Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo (líder) 2. Empresa: RADICIFIBRAS S.A. 3. Universidades: UNICAMP e USP
<p>Voltada para soluções de problemas tecnológicos específicos e inovação (pesquisa aplicada)</p>	<p>O objetivo do projeto foi a obtenção de fibra de carbono de características especiais, ou seja, projeto de pesquisa aplicada para a solução de um problema tecnológico específico</p>
<p>A participação dos parceiros se efetiva com recursos financeiros ou técnicos</p>	<p>O CTMSP e a RADICIFIBRAS participaram com recursos não financeiros (pessoal, instalações e maquinário alocados ao projeto) e financeiros, de pequena monta;</p> <p>As universidades participaram com seu conhecimento técnico, em certas áreas, além de pessoal e acesso a instalações</p>
<p>Divisão de custos, riscos e tempo atinentes a pesquisa, desenvolvimento, produção e lançamento de novos produtos no mercado</p>	<p>O projeto foi dividido por competências. As atribuições foram estabelecidas em função das especialidades dos parceiros. Houve otimização de custos e tempo, como, por exemplo, ao se adequar a planta de fiação da RADIFIBRAS ao processo de obtenção da fibra de PAN. O risco também diluiu-se entre os parceiros do projeto</p>
<p>Acesso a laboratórios e instalações</p>	<p>Os participantes do projeto tiveram acesso a todas as instalações e laboratórios, inclusive aos governamentais (CTMSP)</p>

Pesquisa Cooperativa	Projeto de Desenvolvimento de Fibra de Carbono Nacional para Ultracentrífugas
Acesso a recursos humanos qualificados e a resultados de pesquisas	Essa característica da pesquisa foi claramente observada no projeto de pesquisa cooperativa liderado pelo CTMSP: reuniu-se o que havia de vanguarda na área de ciências de materiais e de fibra de carbono
Benefícios governamentais	Houve o aporte de significativos recursos financeiros governamentais, através da FINEP, órgão vinculado ao MCT
Complementaridade e heterogeneidade dos participantes	A característica de complementaridade, conforme abordada no Capítulo 3, não foi observada, embora os participantes sejam heterogêneos. Entretanto, caso se considere que as atividades desenvolvidas em conjunto por universidades, empresas e comunidade tecnológica devam ser complementares por representarem uma cadeia lógica de P,D&I, o projeto apresentou essa característica
Disseminação e internalização de todos os resultados da pesquisa entre os participantes	Observou-se que parcela significativa dos resultados da pesquisa foi disseminada e internalizada
Sinergismo	Essa característica foi observada. Os parceiros atuaram de forma complementar e harmônica, dando <i>feedback</i> uns aos outros, o que permitiu o avanço do desenvolvimento

Pesquisa Cooperativa	Projeto de Desenvolvimento de Fibra de Carbono Nacional para Ultracentrífugas
Difusão do conhecimento	Houve a produção de diversos trabalhos científicos como decorrência do projeto de pesquisa cooperativa; além disso, houve qualificação de pessoal em áreas estratégicas da ciência de materiais
Acordo administrativo para regular o desenvolvimento da parceria e divisão de resultados	Observado no primeiro momento da pesquisa: foi assinado um convênio entre os participantes e a FINEP; Ao término do acordo com a FINEP, as instituições passaram a atuar sem acordo formal, baseados em uma relação de confiança muito importante em projetos desse tipo

O projeto para desenvolvimento de fibra de carbono liderado pelo CTMSP, com a participação da UNICAMP, USP e RADICIFIBRAS, atendeu às características ou constructos de um projeto de pesquisa cooperativa. Adotou-se, como referencial teórico principal para pesquisa cooperativa, sem a elas se limitar, além dos estudos exploratórios realizados, as definições e orientações do Ministério de Ciência e Tecnologia (2005), por serem de uma formulação mais abrangente quanto à tipologia do termo.

A par do desenvolvimento tecnológico alcançado, houve a formação de pessoal qualificado e o avanço material nas instalações de todos os parceiros, os quais atualizaram laboratórios e instalações a fim de atender às necessidades do projeto.

Observou-se que os parceiros atuaram por competências, possuindo atribuições específicas. Entretanto, houve difusão do conhecimento obtido e um decorrente aumento das capacidades de cada parceiro. A necessidade de troca de informações constantes para evolução das características das fibras de PAN e de carbono, a cada etapa de fiação e “queima”, ocasionou a formação de um sinergismo

e relação de confiança, muito propícios à evolução do projeto, conforme observado nas práticas de sucesso descritas no Capítulo 5.

A escolha, a negociação e o estabelecimento das atribuições de cada um dos parceiros foi também um fator crítico de sucesso.

O incentivo governamental obtido por meio de aporte financeiro da FINEP viabilizou a realização do projeto.

Entretanto, a não obediência a um fluxo regular de repasse de recursos pela FINEP, o depósito de recursos próximo ao final do exercício financeiro e a observância de regras rígidas de contratação e aquisição pelo CTMSP ocasionaram dificuldades para a consecução das metas e atrasos nos prazos previstos do projeto.

Uma solução para a questão acima colocada e que começou a ser adotada pela FINEP nos projetos desenvolvidos pela Marinha desde então é o repasse de recursos a uma fundação de apoio à pesquisa científica, credenciada pelo CNPq. Essas fundações recebem os recursos sem necessidade de observância do princípio da anualidade orçamentária, pelo qual os recursos recebidos em um ano devem ser gastos no mesmo ano (exercício financeiro). Assim, os recursos recebidos ficam à disposição durante toda a vigência do convênio.

Além disso, fundações são dotadas de estrutura e regras de aquisição mais ágeis e céleres do que órgãos como o CTMSP.

O projeto, conforme pesquisa documental e entrevistas realizadas, foi considerado bem sucedido. No encerramento do acordo com a FINEP, em dezembro de 2006, a formulação da fibra de carbono desenvolvida a partir da PAN nacional ainda não havia alcançado inteiramente as características de tensão e elasticidade desejadas, mas chegou muito próxima aos índices da fibra de referência.

No decorrer de 2007 os trabalhos de pesquisa prosseguiram e, no início de 2008, os parâmetros desejados da fibra de carbono de alto desempenho foram alcançados. Isso foi possível devido ao empenho dos parceiros da pesquisa cooperativa que prosseguiram no desenvolvimento com recursos próprios.

A obtenção da qualificação na produção de fibra de carbono levou a que grupos empresariais interessados em sua comercialização procurassem os

participantes do projeto a fim de negociarem um acordo de produção para atender o mercado nacional.

O interesse do mercado nacional na produção da formulação de fibra de carbono obtida no projeto representa o fechamento de um ciclo que começou na constatação de uma necessidade não atendida por esse mesmo mercado.

A pretensão inicial da Marinha era obter fibra de carbono em escala pré-comercial para atender sua demanda de ultracentrífugas e, futuramente, conseguir escala/viabilidade comercial no país. Entretanto, o quadro atual de crescimento do comércio desse tipo de fibra levou a uma evolução positiva do cenário inicialmente projetado, com benefícios e impactos muito positivos, conforme abordado no Capítulo 5 deste trabalho.

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Esta pesquisa teve por objeto o estudo de um projeto de pesquisa cooperativa para o desenvolvimento de fibra de carbono de características de alto desempenho para aplicações em ultracentrífugas do ciclo do combustível nuclear.

Foram parceiros nesse empreendimento uma ICT (CTMSP), universidades (USP e UNICAMP) e uma empresa (RADICIFIBRAS). O projeto transcorreu entre 2005 e 2008 e teve apoio financeiro governamental por meio da FINEP, órgão vinculado ao Ministério de Ciência e Tecnologia.

Foi realizada pesquisa bibliográfica visando caracterizar a rota tecnológica da fibra, seu mercado e restrições ao comércio.

Também foi feita pesquisa documental nos relatórios técnicos e documentos do projeto de pesquisa cooperativa liderado pelo CTMSP. Tal pesquisa objetivou a caracterização do projeto e das atribuições de cada parceiro, elaboração do marco lógico e identificação dos fatores críticos de sucesso.

Além disso, estudos exploratórios e entrevistas foram realizados para possibilitar ao autor uma maior compreensão sobre o tema.

Neste ponto, relembram-se os objetivos da pesquisa propostos neste estudo, a saber:

1. Estudar o processo tecnológico e de inovação na obtenção de fibra de carbono;
2. Estudar e analisar criticamente o mercado de fibra de carbono no país e no exterior;
3. Identificar os fatores críticos de sucesso para um projeto de pesquisa cooperativa, focalizando a experiência do CTMSP no Projeto de Pesquisa Cooperativa para o desenvolvimento de fibra de carbono para a utilização em ultracentrífugas;

Com relação ao primeiro objetivo, foi caracterizado, em linhas gerais, o processo de obtenção de fibra de carbono a partir da fibra precursora de PAN. Não há material disponível na literatura que contenha o detalhamento técnico desse processo, mas indicações de caráter geral sobre o mesmo. Trata-se de tecnologia

considerada estratégica e com sigilo comercial dos seus detentores. As características da fibra de carbono, seus materiais precursores (piche, raion e PAN) e aplicações foram detalhados. A tecnologia de fibra de PAN foi a indicada para as ultracentrífugas da Marinha. Não há, no Brasil, produção desse tipo de insumo. O desenvolvimento foi dividido em duas plantas principais: a de fiação, situada em São José dos Campos/SP e a de oxidação e carbonização, situada no CTMSP, no campus da USP, em São Paulo. Houve investimentos nessas instalações para adaptá-las ao processo de obtenção da fibra.

Quanto ao segundo objetivo da pesquisa, o mercado de fibra de carbono foi analisado, no país e no exterior (Ásia, Europa e EUA). Não há produtores nacionais de fibra de carbono, com as características desejadas. Essa carência do mercado nacional, aliada a uma dificuldade na obtenção desse material no mercado internacional, levaram o CTMSP a buscar o desenvolvimento e produção desse tipo de fibra. A necessidade do CTMSP decorre da produção de ultracentrífugas do ciclo do combustível nuclear. Nessas, a fibra de carbono é aplicada nos rotores (conjuga leveza e resistência em altas velocidades). É considerada uma tecnologia sensível, alvo de salvaguardas de organismos internacionais preocupados com a proliferação de armas de destruição em massa. Por isso, a importação desse tipo de material (uso dual) sofre restrições e embargos. O mercado internacional é agressivo e dominado por grandes corporações, predominando os produtores japoneses. Há um grande crescimento nas necessidades atuais da fibra por conta do fortalecimento de alguns mercados, já abordados nesse trabalho, como a aviação.

No que se refere ao último objetivo, foi realizada pesquisa bibliográfica, documental e entrevistas com os coordenadores e gerentes do projeto para obter-se uma compreensão e familiarização com a tipologia atinente à pesquisa cooperativa e para fins de compará-la ao projeto liderado pelo CTMSP. Houve a utilização do instrumento de marco lógico, o qual possibilitou uma análise global do projeto. A seguir, foi possível a identificação dos fatores críticos para o sucesso do projeto. A matriz que se formulou para comparar o projeto de pesquisa cooperativa com o projeto liderado pelo CTMSP permitiu identificar os constructos que definem esse

tipo de cooperação e verificar que os mesmos foram observados no projeto em análise.

O arranjo que foi formulado para o desenvolvimento de fibra de carbono nacional foi muito bem delineado. Embora esse tipo de desenvolvimento seja muito difícil e com poucas possibilidades de previsão de sucesso, o projeto teve seu resultado futuro muito favorecido por alguns aspectos iniciais, os quais merecem destaque:

- Ótimo trabalho de pesquisa mercadológica;
- Seleção dos parceiros por competências;
- Atribuições bem definidas e negociadas;
- Confiança e *feedback*.

Nas entrevistas realizadas evidenciou-se para este pesquisador que não havia por parte dos formuladores e condutores do projeto uma base teórica que os conduzisse a deliberadamente identificar nele um projeto de pesquisa cooperativa conforme caracterizado neste trabalho.

Entretanto, ao se analisar, por meio da matriz de comparação no Capítulo 6, as características do projeto em discussão neste trabalho, em relação aos referenciais teóricos de um projeto de pesquisa cooperativa, pode-se afirmar que o projeto atendeu a esses referenciais pela observância das seguintes características principais:

- Participação de quatro instituições no projeto de desenvolvimento de fibra de carbono;
- Projeto buscou a solução de um problema tecnológico;
- Os parceiros colaboraram com recursos técnicos e financeiros;
- Houve divisão de custos e riscos, além da redução do tempo de pesquisa e desenvolvimento;
- Acesso a: laboratórios e instalações dos parceiros, recursos humanos qualificados e a resultados de pesquisas;
- Sinergia entre os parceiros;
- Difusão do conhecimento alcançado;
- Obtenção de benefícios governamentais.

Portanto, este pesquisador conclui que o projeto realizado atendeu aos constructos de Pesquisa Cooperativa e foi muito bem sucedido no alcance de seus resultados, servindo de paradigma para projetos futuros.

Recomendam-se, como possibilidades de estudos futuros, os seguintes:

- Formulação de um modelo conceitual para Pesquisa Cooperativa em instituições que desenvolvam atividades de P,D&I (pesquisa, desenvolvimento e inovação), particularmente organizações militares;
- Divisão de resultados referentes à propriedade intelectual em projetos de Pesquisa Cooperativa que envolvam instituições públicas e privadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 ADULIS, D. **O uso do Marco Lógico na Gestão e Avaliação de Projetos.** Disponível em:
<http://www.rits.org.br/gestao_teste/ge_testes/ge_tmtes_dezembro2001.cfm>.
Acesso em 15 abr. 2008.
- 2 BEBER, A. J. **Comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com compósitos de fibra de carbono.** 2003. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- 3 BRASIL. TRIBUNAL DE CONTAS DA UNIÃO. **Técnicas de auditoria: marco lógico.** Brasília: TCU, 2001.
- 4 BRASIL. MINISTÉRIO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA. **Programa de apoio à capacitação tecnológica da indústria: Pesquisa Cooperativa.** Brasília: MCT, 2005.
- 5 CENTRO TECNOLÓGICO DA MARINHA EM SÃO PAULO. **Relatório Final de Atividades 7.1, 7.2 e 7.6 - Projeto FINEP – FIBRCARBONO – CTMSP.** Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo, 2007
- 6 CLARK, R. **Fundamentals of negotiation.** 1998. Disponível em:
<<http://www.anu.edu.au/people/Roger.Clarke/SOS/FundasNeg.html>>. Acesso em 17 jun.2006.
- 7 CLARK, T.D. **Carbon fiber is taking off...Again.** Industrial Market Trends, 2007. Disponível em:
<http://news.thomasnet.com/IMT/archives/2007/07/carbon_fiber_set_to_take_off_again_boeing_dreamliner.html>. Acesso em 12 jun. 2008.
- 8 COMPOSITES WORLD. **Fiber demand and supply.** Sourcebook 2008. Composite World, 2007. Disponível em
<<http://www.compositesworld.com/sb/article/112368>>. Acesso em 20 dez.2007.
- 9 DEPARTMENT OF DEFENSE. **Composite materials handbook. Polymer matrix composites: materials properties. V.2.** Jun.2002. (MIL-HDBK-17-2F). Disponível em: <<http://www.snebulos.mit.edu/projects/reference/mil-std/mil-hdbk-17-2f>>. Acesso em 15 mai. 2006.
- 10 DEPARTMENT OF DEFENSE. **Polyacrilonitrile (PAN) Carbon Fibers Industrial Capability Assessment.** October, 2005. Disponível em:

<http://www.acq.osd.mil/ip/docs/pan_carbon_fiber_report_to_congress_10-2005.pdf>. Acesso em 16 jun. 2006.

- 11 FITZER, E.; GKOGKIDIS, A.; HEINE, M. **Carbon fibers and their composites (a review)**. High Temperatures-High Pressures 16: 363-392. 1984. Disponível em <<http://www.hthpweb.com/>>. Acesso em 20 mai. 2007.
- 12 FREITAS, M. E. **Organização: um espaço de negociação**. Revista de Administração de Empresas, São Paulo, v. 34, set./out. 1994, p. 13-20.
- 13 GIL, A.C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. São Paulo: Atlas, 2005.
- 14 HEXCEL PRESS RELEASE. **Hexcel Announces Agreement to Provide Carbon Fiber for USEC's American Centrifuge Plant**, 2007a. Disponível em <<http://www.financialnewsusa.com/release.php?rlsid=1052>>. Acesso em 20 abr.2008
- 15 HEXCEL PRESS RELEASE. **Hexcel opens first carbon fiber plant in Spain**. 2007b. Disponível em: <<http://www.hexcel.com/News/Market+News/Hexcel+opens+first+carbon+fiber+plant+in+Spain.htm>>. Acesso em 15 abr.2008.
- 16 INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Information Circular**. INFCIRC/254/Rev7/Part1. 23 feb.2005. Disponível em: <<http://www.nuclearsuppliersgroup.org/public.htm>>. Acesso em 10 jun. 2006.
- 17 INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Model Protocol Additional to the Agreement between States and the International Atomic Energy Agency for the Application of Safeguards**. Disponível em: <<http://www.iaea.org/Publications/Documents/InfCircs/1997/infcirc540c.pdf>>. Acesso em 11 jun. 2006.
- 18 LEI nº. 8.666, de 21 de junho de 1993. **Regulamenta o art. 37, inciso XXI, da Constituição Federal, institui normas para licitações e contratos da Administração Pública e dá outras providências**. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L8666cons.htm>. Acesso em 30 mai. 2008.
- 19 LEI nº. 9.112, de 10 de outubro de 1995, regulamentada pelo Decreto no. 1.861, de 15 de abril de 1996. **Dispõe sobre a exportação de bens sensíveis e serviços diretamente vinculados**. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L9112.htm>. Acesso em 16 mai. 2006.

- 20 LONGO, W.P.; OLIVEIRA, A.R.P. **Pesquisa cooperativa e centros de excelência**. Parcerias Estratégicas, Brasília: Ministério da Ciência e Tecnologia, Centro de Estudos Estratégicos, n. 9, p. 129-144, out.2000.
- 21 KATZ, M., **An Analysis of Cooperative Research and Development**, *Rand Journal of Economics*, 17, No. 4, p. 527-543, 1986.
- 22 MATHEWS, J.A. **The origins and dynamics of Taiwan's R&D consortia**. *Research Policy*, Volume 31, Issue 4, May 2002, p. 633-651. Disponível em: <<http://www.mgsm.edu.au/facultyhome/john.mathews/docs/article1.pdf>>. Acesso em 17 out.2007.
- 23 NATIONAL RESEARCH COUNCIL. **High Performance Synthetic Fibers for Composites**. National Academies Press, 1992. Disponível em <<http://www.nap.edu/catalog/1858.html>>. Acesso em 16 mai. 2006.
- 24 NATIONAL RESEARCH COUNCIL. **High-Performance Structural Fibers for Advanced Polymer Matrix Composites**. National Academies Press, 2005. Disponível em <<http://www.nap.edu/catalog/11268.html>>. Acesso em 16 mai. 2006.
- 25 RASMUSSEN, B. **Market Trends: This industry is ready to explode**. In: *Composites World Carbon Fiber Conference*. Washington, 2007. Disponível em <<http://www.compositesworld.com/columns/market-trends-this-industry-is-ready-to-explode.aspx>>. Acesso em: 14 jun. 2008.
- 26 ROLLER, L.H.; TOMBAK, M.M.; SIEBERT, R. **Why firms form research joint ventures: theory and evidence**. Helsinki School of Economics, 1997. Disponível em: <<http://www.ideas.repec.org/p/wzb/wzebiv/fsiv97-6.html>>. Acesso em 17 out.2006.
- 27 SILVA, O.L.P.; MARQUES, A.L.F. **Enriquecimento de urânio no Brasil. Desenvolvimento da tecnologia por ultracentrifugação**. *Economia e Energia*. Rio de Janeiro, n. 54, 2006, p. 3-9. Disponível em: <http://ecen.com/para_imprimir/eee54p.pdf>. Acesso em 30 nov. 2007
- 28 SILVA, E.L.; MENEZES, E. M. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. 4. ed. rev. atual. Florianópolis: UFSC, 2005. Disponível em: <<http://www.posarq.ufsc.br/download/metPesq.pdf>>. Acesso em: 28 mai. 2007.

- 29 SAKAKIBARA, M.; BRANSTETER, L.G. **When do research consortia work well and why?** Evidence from japanese panel data. 2000. Disponível em: <<http://www.nber.org/papers/w7972>>. Acesso em 17 out.2006.
- 30 SAKAKIBARA, M. **Knowledge sharing in cooperative research and development.** Working Paper Series. Columbia University, 1998.
- 31 TOHO-TENAX PRESS RELEASE. **Capacity expansion of Carbon Fiber Tenax**, 2007a. Disponível em < http://www.tohotenax-eu.com/uploads/media/Capacity_Expansion_in_Europe_01.pdf>. Acesso em 04 mai.2008.
- 32 TOHO-TENAX PRESS RELEASE. **Capacity Expansion for Carbon Fiber TENAX**, 2007b. Disponível em <<http://www.tohotenaxamerica/pdfs/capacityincreaseannouncement.pdf>>. Acesso em 04 mai.2008.
- 33 TORAY PRESS RELEASE. **Toray to Expand Production Capacity of PAN-based Carbon Fiber TORAYCA* in Ehime Plant — Total investment to reach ¥16 billion.** Disponível em <<http://www.toray.com/news/carbon/nr080219.html>>. Acesso em 20 mai.2008.
- 34 TRACESKI, F.T. **Assessing industrial capabilities for carbon fiber production.** Aquisition Review Quarterly – Spring, 1999.
- 35 UPSON, P. **Centrifuge technology: the future for enrichment.** World Nuclear Association Symposium. 5-7 september 2001 – London.
- 36 WASSENAAR ARRANGEMENT. **The Wassenaar Arrangement on export controls for conventional arms and dual-use goods and technologies.** Disponível em:< <http://www.wassenaar.org/controllists/>>. Acesso em 11 jun. 2006.

BIBLIOGRAFIA RECOMENDADA

- 1 BRASIL. MINISTÉRIO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA. **Programa de estímulo à interação Universidade-Empresa para apoio à inovação**. Brasília: MCT, 2002.
- 2 BALESTRIN, A.; VERSCHOORE, J. **Redes de cooperação empresarial: estratégias de gestão na nova economia**. Porto Alegre: Bookman, 2008.
- 3 FRAGOMENI, A. S. **A pesquisa cooperativa como solução para o desenvolvimento tecnológico**. Disponível em <<http://www.engenheiro2001.org.br/programas/980215a1doc>>. Acesso em 15 mai. 2006.
- 4 IGAMI, M. P. Z.; ZARPELON, L. M. C. (org.). **Guia para elaboração de dissertações e teses**. São Paulo: IPEN, 2002.
- 5 LEI nº. 10.973, de 02 de dezembro de 2004, regulamentada pelo Decreto nº. 5.563, de 11 de outubro de 2005. **Dispõe sobre incentivos à inovação e à pesquisa científica e tecnológica no ambiente produtivo e dá outras providências**. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/Lei/L10.973.htm>. Acesso em 16 mai. 2006
- 6 MOURA, C. R.R. **Brazil and the Nuclear Suppliers Group: A recent NSG Member State's perspective**. International Seminar on the role of export controls in nuclear non-proliferation. Viena, 1997. Disponível em <<http://www.nuclearsuppliersgroup.org/PDF/seminarcontrol1.pdf>>. Acesso em 10 jun. 2006.
- 7 SCHOLZE, S.; CHAMAS, C. **Instituições públicas de pesquisa e o setor empresarial: o papel da inovação e da propriedade intelectual**. Parcerias Estratégicas, Brasília: Ministério da Ciência e Tecnologia, Centro de Estudos Estratégicos, n. 8, p. 85-92, mai.2000.
- 8 SEVERINO, A.J. **Metodologia do trabalho científico**. 22. ed. rev. e ampl. de acordo com a ABNT - São Paulo: Cortez, 2002.
- 9 ZOUAIN, D.M. **Parques Tecnológicos. Propondo um modelo conceitual para regiões urbanas: o Parque Tecnológico de São Paulo**. 2003. Tese (Doutorado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.