

ANÁLISE EXPERIMENTAL APLICADA AO ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DE FIBRAS DE CARBONO PARA REFORÇO ESTRUTURAL

Fabio Dias Oliveira

*Bacharelado do Curso de Engenharia Civil da Universidade Evangélica de Goiás – UniEVANGÉLICA
(fabiof949@gmail.com)*

Luiz Carlos Felix Maia

*Bacharelado do Curso de Engenharia Civil da Universidade Evangélica de Goiás – UniEVANGÉLICA
(luizcarlos012@gmail.com)*

Marina Lopes Oliveira

*Bacharelada do Curso de Engenharia Civil da Universidade Evangélica de Goiás – UniEVANGÉLICA
(marinalps-@hotmail.com)*

Wendel José Teles

*Bacharelado do Curso de Engenharia Civil da Universidade Evangélica de Goiás – UniEVANGÉLICA
(jeremias.teles@hotmail.com)*

Aurélio Caetano Feliciano

*Professor Especialista do Curso de Engenharia Civil da Universidade Evangélica de Goiás –
UniEVANGÉLICA (aureliocfeng@gmail.com)*

RESUMO

Um dos grandes desafios do Brasil é a implementação de novas tecnologias na área da construção civil, como a gestão de resíduos sólidos, utilização de fibras para reforço estrutural e novas formas de gestões organizacionais. O estudo da utilização de fibras como reforço estrutural é de grande importância quando se trata de recuperação estrutural de uma peça. Diante dessa definição, o estudo a seguir tem como objetivo desenvolver e analisar o comportamento e a resistência de dois traços de concreto distintos após uma cura de 28 dias, com ênfase na utilização da fibra de carbono para reforçar uma estrutura fragilizada, que não tenha atingido a resistência esperada em projeto ou caso esteja sendo degradada por questões de intempéries físico, químicas devido ao tempo de vida útil da construção. Para fins de desenvolvimento deste trabalho realizou-se o ensaio de compressão axial do concreto, com o auxílio da ABNT NBR 5739:2018 – Concreto – Ensaio de Compressão de corpos de prova cilíndricos, a fim de obter resultados para o experimento e posteriormente realizar análise comparativa dos corpos de prova sem a fibra com a resistência baixa e com a fibra de carbono. Após o rompimento dos corpos de prova, pode-se observar que o concreto feito com o primeiro traço obteve uma carga média de ruptura de 11,2 MPa, esse mesmo concreto reforçado com uma camada de fibra de carbono obteve uma carga média de ruptura de 23,6 MPa, um aumento de 111% na sua resistência. O concreto feito com o segundo traço sem a fibra obteve uma carga média de ruptura de 14,2 MPa, o mesmo concreto reforçado com uma camada de fibra de carbono apresentou uma carga média de ruptura de 29,0 MPa, demonstrando um aumento de 105% na sua resistência. Por fim, ao romper o concreto feito com o primeiro traço reforçado com duas

camadas da fibra de carbono, sua carga média de ruptura foi de 40,8 MPa, um ganho de 264% de resistência em relação ao concreto sem o reforço.

PALAVRAS-CHAVE: Fibra de Carbono, Reforço Estrutural, Ensaio de Resistência a Compressão, Corpo de prova.

1 INTRODUÇÃO

Com a constante evolução dos materiais, logo se viu a invenção do concreto armado que data do século XVII e, desde então, tornou-se o material construtivo mais utilizado do mundo, devido ao baixo custo de execução (comparado a estruturas metálicas); comportamento e propriedades conhecidos graças a diversos estudos realizados; e normas bem definidas (BOTELHO, 2018).

O cenário da engenharia civil atualmente é uma grande busca de métodos construtivos mais eficientes com os custos baixos. É evidente o aumento de construções mais modernas no Brasil, com tecnologias mais avançadas. Porém, segundo RIGAZZO (2003) há um grande crescimento nas patologias após a finalização das obras, como a deterioração do concreto, sendo assim, a busca por meios de recuperar e reparar as estruturas tem se tornado maior.

Com o avanço da tecnologia, podemos observar que existem várias formas de reparar grandes estruturas de concreto armado, como a fibra de carbono que é utilizada para aumentar a resistenciaresistência de pilares, vigas e lajes.

Esse sistema de reforço é relativamente recente no Brasil e até mesmo no resto do mundo (a maioria dos artigos sobre o assunto foram publicados a partir da década de noventa) faz-se necessário estudos experimentais, principalmente no que diz respeito a pilares, (os experimentos em nosso país concentram-se na análise de vigas) que permitam racionalizar o uso das fibras, através do aprimoramento das técnicas de aplicação, e que, além disso, permita a verificação dos procedimentos de dimensionamento das peças estruturais reforçadas ou a elaboração de novos procedimentos de cálculo para as mesmas. (RIGAZZO, 2003).

Assim, o trabalho a ser apresentado demonstra o comparativo do concreto simples com baixa resistência final e o reforçado com a aplicação das fibras de carbono unidimensional.

2 MÉTODOS CONSTRUTIVOS A PARTIR DO REFORÇO ESTRUTURAL

O concreto simples é composto de cimento, agregado graúdo, agregado miúdo e água, podendo conter aditivos, optando da finalidade que o engenheiro for aderir, assim, a junção desses materiais torna-o heterogêneo. O concreto armado tem a adição de aço, que consiste em uma armadura para resistir à tração, portanto, o concreto resiste melhor à compressão.

O reforço ou reabilitação de uma alvenaria estrutural deve ser feito de forma minuciosa, realizando-se para isso uma rigorosa análise. Nessa análise devem-se identificar as causas das anomalias e avaliar a segurança estrutural para assim escolher a melhor forma de intervenção (SAMPAIO, 2010).

Para a execução do experimento é feita uma definição de traço do concreto e executa-se de acordo com o que as normas pedem, sendo assim, as normas que foram mais utilizadas para a definição deste trabalho foram: ABNT NBR 5738:2015 – Moldagem e cura de corpo de prova cilíndricoscilíndricos ou prismáticos de concreto; ABNT NBR 5739:2018 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos; ABNT NBR 7211:2015 – Agregados para concreto – Especificações, e por último a NBR NM 67 – Concreto – Determinação da consistenciaconsistência pelo abatimento do tronco de cone.

A necessidade de fazer reforço estrutural vem da decorrência de imprevistos que ocorre com o concreto, como o mau dimensionamento, o desgaste pelo tempo decorrente de intempéries naturais, fissuras, excesso de carga que não foi prevista que ocorre quando o prédio já é muito antigo.

3 REFORÇO ESTRUTURAL COM A UTILIZAÇÃO DE FIBRA DE CARBONO

3.1 FIBRA DE CARBONO

Historicamente, os materiais compósitos poliméricos são relativamente recentes. As primeiras fibras de carbono de alta resistenciaresistência foram introduzidas no início dos anos 1960, com aplicações na área aeronáutica (DANIEL & ISHAI, 1994).

O material da fibra de carbono tem baixa densidade, sua resistenciaresistência a fadiga e o módulo de elasticidade são elevados, sua aplicação no concreto é feita através da resina epóxi. A utilização da fibra em reforço estrutural é um conceito novo e atual, pois ela é mais vista sendo utilizada nas áreas de indústrias aeroespacial, automobilísticasautomobilísticas, equipamentos esportivos, dentre outros.

A fibra de carbono é um material altamente promissor, baseado na força das ligações carbono-carbono e na leveza do átomo carbono (TAYLOR, 1994 *apud* BEBER, 2003).

Segundo Beber (2003), o material é mais utilizado decorrente da sua alta relação entre a resistenciaresistência e rigidez com sua massa, obtém uma grande resistenciaresistência sob altas temperaturas, a rigidez não é alterada com umidade e ações químicasquímicas, físicas e mecanicamecânica, por isso se tornou um material útil na construção civil.

No mercado encontra-se a fibra de carbono vendida de várias formas, como a dimensão que é comercializada, podendo ser unidimensional (tramada apenas em uma direção) ou bidimensionada (tramada em duas direções). Para a realização desta análise e estudo utilizou-se a fibra de carbono unidimensional H12K-UD200, que é apresentada na Figura 1.

Figura 1 - Fibra de Carbono Unidimensional



Fonte: AUTORES, 2022.

3.2 RESINA EPÓXI

As resinas termoplásticas são caracterizadas por macromoléculas mais lineares e poder ser repetidamente fundidas quando aquecidas e endurecidas quando resfriadas. Por

terem mais ductilidade e tenacidade, são mais resistentes a impactos e micro-fissuração que as resinas termoendurecíveis. As resinas termoendurecíveis são caracterizadas por um alto grau de polimerização das moléculas e endurecimento irreversível, se aquecidas depois de endurecidas se fundem e se decompõem se expostas a altas temperaturas (ARAÚJO, 2022).

Utiliza-se a resina epóxi para fazer a aderência entre o corpo de prova e a fibra de carbono. Segundo a ARAÚJO (2020), a resina tem uma excelente resistência à tração (diferentemente do concreto), medido entre 55 à 130 MPa, com um módulo de elasticidade elevado podendo ir de 2,8 à 4,1 GPa.

Para a realização deste estudo a resina utilizada está apresentada na Figura 2, sendo a ES260 misturada com a E35.

Figura 2 - Resina Epóxi



Fonte: AUTORES, 2022.

3.3 FORMAS DE APLICAÇÃO DA FIBRA NOS CORPOS DE PROVA

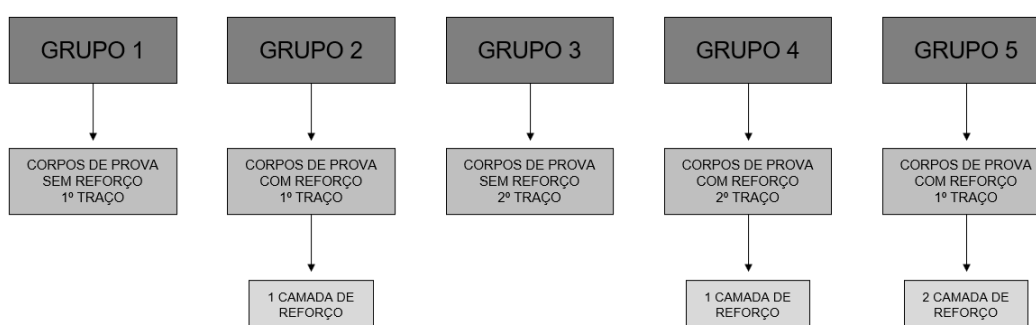
As principais aplicações para o sistema compósito de fibra de carbono são em reforço de vigas à flexão e ao cisalhamento, reforço de lajes à flexão, reforço de pilares e colunas, reforço em chaminés, reforço de tanques, silos e reservatórios. Além dessas aplicações, o compósito de fibra de carbono também pode ser empregado em muros de arrimo, vigas-parede, reforço em tubulações de grande diâmetro e também reforço de túneis (MACHADO, 2002).

Assim que for feita a identificação do tipo de patologia que está afetando a estrutura, deve ser feita uma análise da melhor solução para reparar o dano, sendo assim, o modo de recuperação com a fibra de carbono pode ser uma das opções. Primordialmente, antes de aplicar o compósito, deve-se nivelar a superfície, retirando qualquer imperfeição que possa atrapalhar, posteriormente, após esta regularização pode ser feita a aplicação da manta juntamente com a resina epóxi que vai ajudar na fixação entre a fibra de carbono e a superfície de concreto. É recomendado reaplicar a resina novamente depois de já ter feito a aplicação correta do compósito, para que ela fique mais resistente.

4 MÉTODO EXECUTIVO E MATERIAIS

No decorrer deste capítulo será apresentado como foi realizado o estudo experimental, descrevendo a partir dos materiais que foram utilizados até o rompimento dos corpos de prova com e sem as fibras de carbono. Primeiramente foi realizado dois traços para análise comparativa de resistência. A ideia principal foi romper os corpos de prova após os 28 dias, após o concreto atingir sua resistência máxima, sendo assim, foi separado 50% para serem rompidos logo após a cura total sem o compósito envolvido e os outros 50% com a fibra para posteriormente rompê-los. A seguir, na Figura 3 está representada pelo fluxograma a divisão de etapas definidas por grupos de como foi feito todo o processo de preparo e execução.

Figura 3 - Definição dos grupos dos corpos-de-prova



Fonte: AUTORES, 2022.

4.1 MATERIAIS DEFINIDOS PARA O CORPO DE PROVA

Para o estudo foram utilizados os materiais básicos que constitui o concreto, que são o cimento, areia, brita e água. Sendo assim, foram realizados dois traços de concreto para posteriormente definir os resultados com e sem a fibra de carbono.

4.1.1 Cimento Portland CPII-32

O cimento Portland é um pó fino que tem a função aglomerante, ligante que faz a ligação dos demais compostos do concreto. Seu contato com a água é o que vai dar a propriedade de endurecer a argamassa ou concreto. O cimento utilizado no estudo foi o CPII F – 32 utiliza-se para aplicações gerais, podendo ser usado em estruturas de concreto armado, pavimentos, assentamento de blocos, pisos, contrapisos, revestimentos, entre outros. Na sua composição tem a adição de Fíler calcário, tendo a classe de resistência de 25, 32 ou 40 MPa, sua aplicação é recomendada para meios de agressividade fraca, moderada e forte.

4.1.2 Areia Média

Segundo a NBR 7211 (ABNT, 2005), a areia se encaixa no bloco de agregado miúdo na mistura do concreto. Seus grãos vão de 0,42 a 2 mm, e podem ter tonalidades diferentes, sendo branca, avermelhada ou amarelada, indicando sua característica, e sua origem.

4.1.3 Brita 0

A Brita 0, segundo a NBR 7211 (ABNT, 2005) é denominada como agregado graúdo, sendo que seus grãos passam pela peneira de abertura de malha de 75mm e ficam retidos na peneira com abertura de 4,75mm. Os ensaios que são utilizados para a granulometria deste agregado são a ABNT NBR NM 248 e a ABNT NBR NM ISO 3310-1.

A brita é inserida no concreto com o objetivo de aumentar a durabilidade e a resistência à abrasão do elemento estrutural (IBRACON, 2009).

Tabela 1 - Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)	Porcentagem, em massa, retida acumulada			
	Limites inferiores		Limites superiores	
	Zona utilizável	Zona ótima	Zona ótima	Zona utilizável
9,5 mm	0	0	0	0
6,3 mm	0	0	0	7
4,75 mm	0	0	5	10
2,36 mm	0	10	20	25
1,18 mm	5	20	30	50
600 µm	15	35	55	70
300 µm	50	65	85	95
150 µm	85	90	95	100

NOTAS

- 1 O módulo de finura da zona ótima varia de 2,20 a 2,90.
- 2 O módulo de finura da zona utilizável inferior varia de 1,55 a 2,20.
- 3 O módulo de finura da zona utilizável superior varia de 2,90 a 3,50.

Fonte: NBR 7211 (ABNT, 2005).

Tabela 2 - Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)	Porcentagem, em massa, retida acumulada				
	Zona granulométrica $d/D^{1)}$				
	4,75/12,5	9,5/25	19/31,5	25/50	37,5/75
75 mm	-	-	-	-	0 – 5
63 mm	-	-	-	-	5 – 30
50 mm	-	-	-	0 – 5	75 – 100
37,5 mm	-	-	-	5 – 30	90 – 100
31,5 mm	-	-	0 – 5	75 – 100	95 – 100
25 mm	-	0 – 5	5 – 25 ²⁾	87 – 100	-
19 mm	-	2 – 15 ²⁾	65 ²⁾ – 95	95 – 100	-
12,5 mm	0 – 5	40 ²⁾ – 65 ²⁾	92 – 100	-	-

Fonte: NBR 7211, ABNT (2005).

5 MÉTODO DE APLICAÇÃO

5.1 MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVAS

Antes da moldagem dos corpos de provas, foram realizados os ensaios de abatimento do concreto nos dois tipos de concreto para os experimentos, para analisar sua verificação quanto a sua plasticidade e se obedece aos padrões exigidos perante a norma para o seu uso em elementos estruturais. Os resultados adquiridos dos abatimentos foram de: o primeiro concreto obteve 60 mm de abatimento, e o segundo obteve abatimento de 70 mm.

Conforme a norma NBR 5738 (ABNT, 2015) - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova, foram seguidos todos os procedimentos necessários para garantir qualidade e segurança nos resultados obtidos após o rompimento dos corpos de prova.

Figura 4 - Corpos de prova moldados



Fonte: AUTORES, 2022.

5.2 APLICAÇÃO DA FIBRA NOS CORPOS DE PROVA

Completando o tempo de cura de 28 dias em uma câmara úmida, as amostras ficaram em um local seco e arejado com o objetivo principal de secarem o seu exterior para a aplicação da fibra de carbono. Com a secagem do exterior completa das amostras, realizou-se o preparo da mistura da resina epóxi com o endurecedor e em seguida aplicou-se em toda a extensão do corpo de prova com auxílio de um pincel e a aplicação da fibra de carbono unidirecional no entorno do corpo de prova.

Com a aplicação da fibra de carbono realizada, foi efetuado uma aplicação da resina epóxi por sobre a fibra, essa camada tem como objetivo garantir um melhor acabamento e proteção a agentes externos, após a aplicação deve-se esperar 24 horas

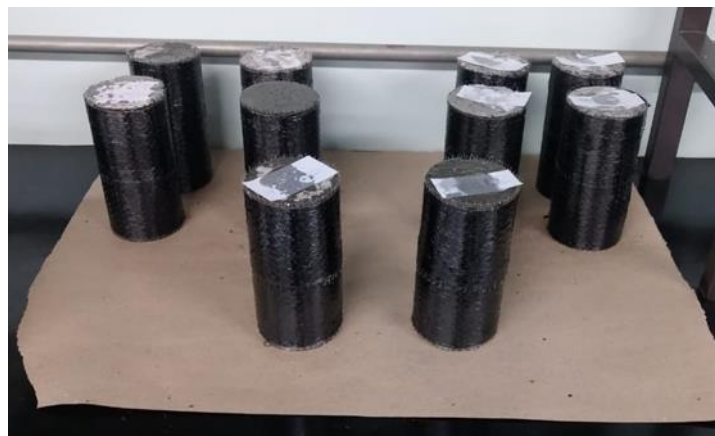
como recomenda o fabricante da resina epóxi para fazer o rompimento dos corpos de provas.

Figura 5 - Aplicação da fibra de carbono



Fonte: AUTORES, 2022.

Figura 6 - Corpos de prova após aplicação da fibra de carbono



Fonte: AUTORES, 2022.

5.3 ROMPIMENTO DOS CORPOS DE PROVA

O processo de rompimento aconteceu em três etapas, a primeira consistiu no rompimento dos corpos de provas dos grupos 1 e 3 que não foram revestidos com a fibra, a segunda etapa consistiu nos rompimentos dos corpos de prova dos grupos 2 e 4 que foram revestidos com uma camada do tecido de fibra de carbono, a terceira etapa consistiu

no rompimento dos corpos de prova do grupo 5 que foram com duas camadas do tecido da fibra de carbono.

Figura 7 - Rompimento do corpo de prova sem fibra de carbono



Fonte: AUTORES, 2022.

Figura 8 - Rompimento do corpo de prova com fibra de carbono



Fonte: AUTORES, 2022.

5.4 RESULTADOS

Analisando os resultados os corpos de prova do grupo 1, 2, 3, 4 e 5 tiveram diferenças nos valores obtidos com o rompimento, assim foi adotado o valor médio para

cada grupo. Entre os corpos de prova sem o reforço com a fibra o que a apresentou o pior resultado foi o de nº 1 com uma resistência de 11,0 MPa, e o melhor resultado entre os sem reforço foi o nº 10 com uma resistência de 15,0 MPa. Entre os corpos de prova com reforço de uma camada da fibra de carbono o pior resultado foi do nº 8 com uma resistência de 19,0 MPa, e o melhor resultado entre os com o reforço de uma cada da fibra foi o nº 13 com uma resistência de 31,6MPa. Por fim os corpos de prova com reforço de duas camadas de fibra de carbono, o pior resultado foi do nº 18 com uma resistência de 37,2 MPa, e o melhor resultado foi o do nº 17 com resistência de 44,5 MPa. Os resultados podem ser visualizados na Tabela 3, em que se observa carga de ruptura e a média de ruptura dos corpos de prova sem reforço e com reforço das fibras de carbono.

Tabela 3 - Resultados do ensaio a compressão dos corpos de prova

ID	Nº DE CAMADAS DE TECIDO DE FIBRA DE CARBONO	TENSÃO DE RUPTURA (MPa)	TENSÃO DE RUPTURA MÉDIA (MPa)
1	0	11,0	11,2
2	0	11,5	
3	0	11,1	
4	0	11,2	
5	1	26,6	23,6
6	1	26,8	
7	1	22,0	
8	1	19,0	
9	0	13,2	14,2
10	0	15,0	
11	0	13,8	
12	0	14,7	
13	1	31,6	29,1
14	1	29,1	
15	1	27,3	
16	1	28,2	
17	2	44,5	40,9
18	2	37,2	

Fonte: AUTORES, 2022.

6 CONCLUSÃO

O uso da fibra de carbono como reforço estrutural vem ganhando cada vez mais espaço no mercado da engenharia civil devido aos seus vários benefícios em comparação aos outros tipos de reforço estrutural. Através do experimento realizado nesse trabalho, analisando os resultados percebeu-se que com a utilização da fibra de carbono como reforço houve um ganho considerável na resistência a compressão dos corpos de prova com uma camada de tecido da fibra, esse ganho chegou a 111% no primeiro tipo de concreto produzido, e 105% no segundo tipo de concreto produzido, já os corpos de prova com duas camadas de fibra de carbono apresentaram um ganho de até 264% de resistência.

Concluimos que a utilização de fibra de carbono como reforço de estruturas para combater a compressão permitiu aumento expressivo na capacidade de carga do concreto, comprovando que o uso da fibra de carbono com a resina epóxi elevou a resistência de peças de concreto e sendo efetiva como um método reforço de reforço estrutural.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118:2003 Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro: Moderna, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738:2015 Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro: Moderna, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211: Agregados para o concreto - Especificação**. Rio de Janeiro: Moderna, 2005.

ARAÚJO, Caroline Maia. Reforço de vigas de concreto à flexão e ao cisalhamento com tecidos de fibra de carbono. **Rio de Janeiro: UFRJ**, 2002.

BEBER, A. J. **Comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com compósitos de fibra de carbono**. 2003. 289 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

BEIM, K. F. Estudo comparativo das tensões cisalhantes na interface entre camadas de um compósito polimérico de fibra de carbono pelos métodos numérico e experimental. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais de Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Autarquia associada à Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

BOTELHO, Manoel Henrique Campos; MARCHETTI, Osvaldemar. **Concreto armado e te amo**. 9. ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 2018.

DANIEL, Isaac M. et al. **Mecânica de engenharia de materiais compósitos**. Nova York: Oxford University Press, 2006.

MACHADO, A. de P.; **Reforço de Estruturas de Concreto Armado com Fibras de Carbono / Ari de Paula Machado**. São Paulo: Editora Pini Ltda., 2002. 282 p.

RIGAZZO, A. O. Reforço em pilares de concreto armado por cintamento externo com mantas flexíveis de fibras de carbono. **Biblioteca Virtual FAPESP–Dissertação de Mestrado, Campinas**, 2003.

SAMPAIO, Marliane Brito. Fissuras em edifícios residenciais em alvenaria estrutural. **São Paulo: Universidade de São Paulo**, 2010.

TAYLOR, G. ***Material in construction***. 2.ed. London: Longman Scientific & Technical, 1994. P. 284