



Aplicação da análise hierárquica como ferramenta de tomada de decisão para escolha do compósito de reforço com polímeros reforçados com fibras

D. H. Perelles¹, M. F. Medeiros¹, M. R. Garcez²

¹Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil.

²Centro de Engenharias, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, Brasil.

Información del artículo

DOI:

<http://dx.doi.org/10.21041/ra.v3i3.52>

Artículo recibido el 05 de Mayo de 2013, revisado bajo las políticas de publicación de la Revista ALCONPAT y aceptado el 23 de Julio de 2013. Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el segundo número del año 2014 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del primer número del año 2014.

RESUMO

O reforço de estruturas com Polímeros Reforçados com Fibras (PRF) é uma alternativa que tem sido muito utilizada em intervenções executadas em elementos de concreto armado. A fibra de carbono é a mais empregada na formação dos compósitos de reforço utilizados em obras civis. Existe, no entanto, a possibilidade de se ampliar as opções de fibras formadoras do compósito utilizando as fibras de aramida e de vidro. Como uma ferramenta alternativa de tomada de decisão, o Método de Análise Hierárquica, baseado em critérios analisados de forma qualitativa e quantitativa, será utilizado neste trabalho para a avaliação das fibras de carbono, aramida e vidro, de forma a se obter qual material seria o mais apropriado para a execução de um reforço estrutural considerando como principais parâmetros de análise os custos dos materiais e as tensões e as deformações que os elementos poderão apresentar. A aplicação desta técnica de interpretação de resultados se mostrou muito útil, podendo ser considerada adequada para estudos que exijam uma tomada de decisão entre diferentes sistemas de reforço com PRF.

Palavra-Chave: reforço estrutural; polímeros reforçados com fibras; carbono; aramida; vidro; método da análise hierárquica.

ABSTRACT

Strengthening structures with Fiber Reinforced Polymers (FRP) is an alternative that has been used in interventions performed on reinforced concrete elements. Carbon fibers are the most used in the formation of composite reinforcement used in civil works. There is, however, possible to expand the options of forming fibers using the composite fibers of aramid and glass. As an alternative decision-making tool, the Analytic Hierarchy Process, based on criteria analyzed qualitatively and quantitatively, will be used in this work for the evaluation of carbon, aramid and glass fibers in order to obtain what material would be more suitable for the implementation of a structural reinforcement considering how key parameters of analysis material costs and the tensions and strains that may exhibit elements. This decision-making tool showed useful and can be considered suitable to select different FRP systems.

Keywords: structural strengthening; fiber-reinforced polymers; carbon; aramid; glass; hierarchical analysis method.

Autor de contacto: M. R. Garcez (mrgarcez@hotmail.com)

© 2013 ALCONPAT Internacional

Información Legal

Revista ALCONPAT, Año 3, No. 3, Septiembre - Diciembre 2013, es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A.C., Av. Zamná No. 295 entre 61 y 63 Fraccionamiento Yucalpetén, Mérida, Yucatán, México, C.P. 97248, Tel. 5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org
Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Av. Zamná No. 295 entre 61 y 63 Fraccionamiento Yucalpetén, Mérida Yucatán, México, C.P. 97248, fecha de publicación: 30 de septiembre de 2013.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor. Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

1. INTRODUÇÃO

Apesar do desenvolvimento positivo referente às aplicações dos Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono (PRFC) no reforço de vigas de concreto armado, existem diversas possibilidades de aplicação de outros compósitos, pouco explorados, que podem favorecer em vários aspectos o reforço estrutural de um elemento de concreto armado. A grande maioria dos sistemas de reforço com PRF (Polímeros Reforçados com Fibras) consiste de um compósito em que fibras de carbono são embebidas em uma matriz epoxídica, porém, segundo (Meier, 2005) a questão de qual material é o mais adequado é ainda um assunto de longa discussão.

Assim, a análise da variação do efeito causado pelo tipo de fibra formadora do compósito, tendo como parâmetros as principais fibras utilizadas em reforço estrutural: carbono, aramida e vidro, se torna cada vez mais importante para a realização de projetos de reforço mais viáveis, aliando questões técnicas e econômicas.

Levando-se em conta a necessidade de escolha do tipo de compósito para o reforço de vigas de concreto armado, fica clara a importância deste trabalho que vem propor o emprego da técnica de análise hierárquica como uma metodologia de escolha, considerando uma visão sistêmica, levando em consideração parâmetros priorizados como mais relevantes analisados em conjunto, de forma qualitativa ou quantitativa.

Neste sentido, o objetivo deste trabalho é utilizar o método de análise hierárquica como ferramenta para tomada de decisão na determinação de qual polímero reforçado com fibras é o mais apropriado para o reforço à flexão de uma viga de concreto armado. Os parâmetros avaliados e os pesos aplicados em cada critério levam em conta que o principal fator a ser considerado no reforço de um elemento estrutural, independente da natureza do compósito de reforço utilizado, é a segurança quanto às tensões e aos deslocamentos.

2. ANÁLISE COMPARATIVA DAS FIBRAS DE CARBONO, VIDRO E ARAMIDA

Tendo em vista que os polímeros reforçados com fibras empregados como reforço vão ser usados com fins estruturais, é fundamental determinar uma série de propriedades físicas e mecânicas, que são influenciadas pelo tipo de fibra e matriz empregados, pela proporção entre fases, pela orientação das fibras na matriz e pelas técnicas de produção e controle de qualidade adotadas durante o processo de manufatura. Por outro lado, diversos fatores ambientais, tais como temperatura, umidade, presença de água salgada, presença de álcalis, ciclos de gelo-degelo e radiação ultravioleta, podem afetar o desempenho dos polímeros reforçados com fibras. A seguir, aspectos relativos ao custo, à durabilidade e às propriedades físicas e mecânicas das fibras de carbono, vidro e aramida são analisadas de forma comparativa, permitindo a identificação das potencialidades e fraquezas dos sistemas de reforço formados pelos diferentes tipos de fibra.

2.1 Resistência à tração.

O comportamento à tração de polímeros reforçados com apenas um tipo de fibra é caracterizado por uma relação tensão-deformação elástico linear até a ruptura, que ocorre de forma brusca e pode ser catastrófica (ACI 440.2R-08, 2008). A utilização de polímeros reforçados com fibras no reforço à flexão de elementos de concreto armado demanda que estes materiais apresentem adequada resistência à tração. Mesmo que a resistência à tração das fibras de vidro do tipo E seja inferior à das fibras de carbono e aramida, sua utilização ainda pode ser indicada em situações onde a demanda de resistência no reforço seja compatível com suas características.

2.2 Resistência à compressão.

As resistências à compressão axial de polímeros à base de fibra carbono, vidro e aramida equivalem a 78%, 55% e 20% da resistência à tração destes materiais, respectivamente (ISIS, 2003). As fibras de aramida apresentam um comportamento não linear à compressão em níveis de tensão relativamente baixos, o que indica que a resistência à compressão axial de polímeros à base de fibra aramida equivale a apenas 20% de sua resistência à tração. Portanto, se por algum motivo um elemento estrutural reforçado com polímeros reforçados com fibras de aramida for submetido a tensões de compressão seu desempenho será muito inferior ao de um elemento estrutural reforçado com os outros tipos de fibras. Isto desfavorece a fibra aramida, mas a significância deste item é reduzida.

2.2 Rigidez.

Dentre as fibras de alto desempenho mais empregadas nos sistemas com polímeros reforçados com fibras, as de carbono são as que possuem módulos de elasticidade mais elevados, relativamente às fibras de vidro e de aramida, com valores comparáveis ou superiores aos do aço. Grande parte dos elementos estruturais que necessitam reforço exige materiais que apresentem elevada rigidez, que pode ser obtida com a utilização de materiais de elevado módulo de elasticidade como os polímeros de fibra de carbono. Devido ao baixo módulo de elasticidade, os sistemas reforçados com fibras de vidro são indicados somente para reforços de elementos estruturais que aceitem maiores deformações.

2.3 Ductilidade.

Polímeros reforçados com fibras de aramida, aplicados em estruturas de concreto armado, resultam em estruturas que apresentam maior capacidade de rotação plástica antes da ruptura, o que pode ser utilizado como um indicativo de ductilidade. Este desempenho muitas vezes não se manifesta em estruturas reforçadas com PRF de carbono e vidro. Sistemas híbridos compostos por fibras de carbono e vidro são muito utilizados no reforço de elementos estruturais submetidos a ações sísmicas, uma vez que, combinando o baixo módulo de elasticidade das fibras de vidro com o elevado módulo de elasticidade das fibras de carbono, proporcionam ductilidade e aumento na capacidade de carga aos elementos reforçados (S&P Clever Reinforcement Company, 2006).

2.4 Resistência à fadiga.

Segundo (Hearing e Buyukozturk, 2000), compósitos reforçados com fibras rígidas, como as de carbono, exibem excelente resistência à fadiga. Pode-se considerar que os reforços com fibras de carbono favorecem a resistência à fadiga dos elementos reforçados, já que proporcionam uma redução na fissuração e melhoram a distribuição das fissuras ao longo do elemento, antes da ruptura. O baixo desempenho à fadiga das fibras de vidro é atribuído à baixa rigidez destas fibras, que resulta em uma menor transferência de tensões e uma maior exposição da matriz a grandes tensões e deformações. Embora as fibras de aramida possuam rigidez intermediária, entre as fibras de carbono e de vidro, o mesmo não pode ser dito em relação ao seu comportamento à fadiga, já que estas fibras são sensíveis aos danos causados por um processo chamado desfibrilação, que eventualmente pode levar a rupturas por fadiga (ISIS, 2003).

2.5 Fluência ou deformação lenta.

A deformação lenta em estruturas reforçadas com polímeros reforçados com fibras é significativa apenas quando os mesmos são submetidos a elevados níveis de tensão. O fenômeno da

deformação lenta não afeta os polímeros reforçados com fibras de carbono mantidos em níveis de tensão de até 50% da sua resistência última. Níveis máximos de 20% são recomendados para os polímeros reforçados com fibras de vidro que são bastante susceptíveis ao fenômeno da fadiga estática discutido anteriormente. Polímeros reforçados com fibras de aramida apresentam um comportamento intermediário entre os demais.

2.6 Resistência ao impacto.

A resistência ao impacto de um polímero reforçado com fibras tende a ser mais elevada quando este é formado com fibras de aramida, em relação aos formados com fibras carbono e vidro. Entretanto, deve-se observar que a combinação de um reforço fabricado com matriz polimérica termoplástica, sob baixas temperaturas, submetido a cargas de impacto pode resultar em um comportamento frágil, que vai se tornando mais dúctil à medida que a temperatura vai aumentando. A fabricação de polímeros reforçados híbridos, que combinam fibras de aramida com fibras de vidro ou de carbono, tende a fornecer resultados que superam a resistência ao impacto dos compósitos formados somente com a utilização das fibras de carbono e vidro.

2.7 Propriedades elétricas.

Como as fibras de carbono são materiais capazes de conduzir corrente elétrica e as fibras de vidro e aramida são materiais isolantes, a sua utilização pode se adequar aos mais variados tipos de utilização. A aplicabilidade dos três tipos de fibras, quando comparadas em relação às suas propriedades elétricas, dependerá das condições desejadas, em termos de isolamento elétrico, para a estrutura que receberá o reforço.

2.8 Expansão térmica.

Embora os coeficientes de expansão térmica das resinas e dos adesivos também devam ser considerados quando se avalia a aplicação de um polímero reforçado com fibras em estruturas de concreto, os reforços com fibra de vidro parecem ser mais adequados à utilização nestas estruturas, devido à similaridade nos coeficientes de expansão térmica das fibras de vidro e do concreto. Entretanto, segundo o (ACI 440.2R-08, 2008), a aderência dos polímeros reforçados com fibras ao substrato de concreto começa a ser prejudicada quando as variações de temperatura atingem valores superiores a ± 28 °C.

2.9 Resistência à umidade.

A presença de umidade pode ocasionar perdas substanciais nas propriedades físicas dos compósitos, quando seus materiais componentes apresentam elevados índices de retenção de água. As fibras de carbono apresentam baixa retenção de água e por isso podem ser consideradas como as menos afetadas pela presença de umidade. Entretanto, embora fibras de aramida e vidro apresentem elevada retenção de água, sua utilização pode ser indicada em ambientes onde os teores de umidade ou de vapor de água sejam reduzidos.

2.10 Elevadas temperaturas.

Em geral, as fibras formadoras dos compósitos não se degradam, quando submetidas às temperaturas inferiores a 80°C. Entretanto, como as resinas e adesivos utilizados na formação e aplicação dos compósitos do tipo polímero reforçado com fibras não resistem a elevadas temperaturas, a aplicação de temperaturas em torno de 80°C pode causar danos que prejudiquem a ação do compósito.

2.11 Radiação ultravioleta.

Embora as fibras de aramida possuam baixa resistência à ação de radiação ultravioleta, sua utilização em sistemas compósitos de reforço pode ser combinada com sistemas de proteção que servem como camadas de sacrifício, protegendo as fibras de eventuais danos. Já as fibras de carbono e vidro são resistentes à ação de raios ultravioleta. O bom comportamento do sistema de reforço quanto à ação da radiação ultravioleta, todavia, depende primariamente das formulações adesivas que formarão a matriz do compósito.

2.12 Corrosão.

Processos corrosivos, do tipo galvânico, podem ser desencadeados quando fibras de carbono entram em contato direto com o aço, fato que demanda atenção dos projetistas de sistemas de reforço com polímeros reforçados com fibras de carbono. Como as fibras de vidro e aramida são isolantes, seu contato com o aço ou a água não tende a gerar processos corrosivos.

2.13 Resistência aos álcalis.

Fibras de vidro são reconhecidamente intolerantes à presença de álcalis, que podem acelerar os processos de deterioração que afetam estas fibras. O fato das fibras de um polímero reforçado estarem completamente cobertas por resina não impede a ocorrência de degradação nas fibras, uma vez que regiões danificadas na resina podem permitir o contato da fibra de vidro com a água existente nos poros do concreto. As fibras de carbono possuem uma excelente resistência a álcalis, enquanto as fibras de aramida são menos susceptíveis à ação de álcalis.

2.14 Resistência a ciclos gelo-degelo.

Ciclos de gelo e de gelo podem afetar o desempenho das estruturas reforçadas com polímeros reforçados com fibras, estimulando a formação de micro-fissuras e vazios na matriz polimérica. A diferença entre os coeficientes de expansão térmica das fibras e da matriz também pode causar danos quando as diferenças de temperatura são extremamente elevadas. Pode-se admitir, de forma geral, que os polímeros reforçados formados com fibras de carbono, vidro e aramida apresentam bom comportamento quando submetidos a ciclos de gelo-degelo.

2.15 Custo.

As fibras de vidro apresentam um custo bem inferior das fibras de carbono e aramida. Entretanto, deve-se analisar que para se atingir o mesmo nível de um reforço dimensionado com fibra de carbono utilizando-se fibra de vidro, é necessária a utilização de uma quantidade bem maior de fibra de vidro em relação à quantidade de fibra de carbono utilizada. A utilização de uma maior quantidade de fibra, por sua vez, exige a utilização de mais resina ou adesivo e consome mais horas de trabalho, aumentando o custo de utilização do sistema. Portanto, somente a análise da relação custo-benefício referente à utilização de cada sistema de reforço permitirá a escolha da fibra mais adequada para formar o compósito.

3. APLICAÇÃO DO MÉTODO DE ANÁLISE HIERÁRQUICA

3.1 Método da análise hierárquica.

O método de análise hierárquica (Analytic Hierarchic Process, AHP), proposto por Saaty no início dos anos 70, tem por objetivo a escolha de uma determinada alternativa dentre outras de forma que tal seleção esteja fundada em critérios de avaliação. No presente trabalho, as alternativas disponíveis se remetem aos tipos de fibras compostas pelos materiais carbono,

aramida e vidro (Figura 1) que, unidas a uma matriz polimérica, compõem um sistema de reforço estrutural que pode ser aplicado em elementos de concreto armado.

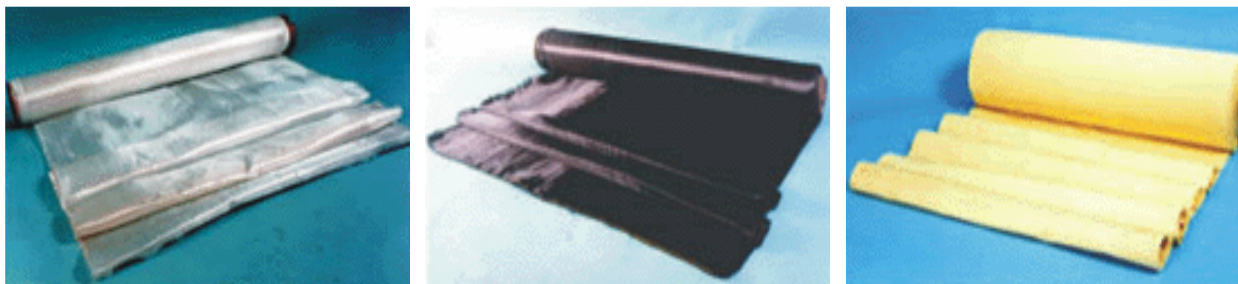


Figura 1. Tecidos de fibra de vidro, carbono e aramida.

O processo de decisão é caracterizado pela avaliação de um conjunto de alternativas. Com o rol disponível e com a priorização dos critérios considerados, a decisão pode ser feita e os resultados podem ser obtidos. Um esquema do processo de decisão pode ser visto na Figura 2.

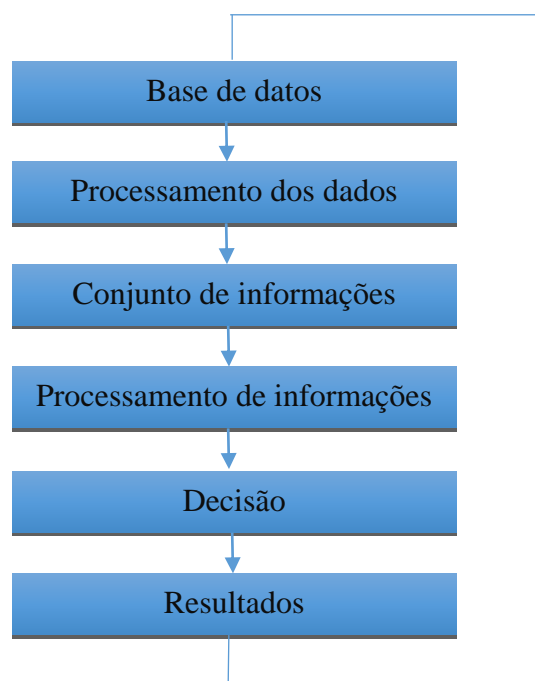


Figura 2. Macrofluxo do processo decisório (Costa, 2002).

Vale destacar que a subjetividade é inerente ao processo de decisão. Em função disso, os dados reais possíveis de serem aplicados no processo de tomada de decisão, como por exemplo, valores de custos e propriedades físicas ou mecânicas dos materiais, tornam científico o método de análise hierárquica.

Existem duas fases bem distintas durante o processo de decisão utilizando o conceito da análise hierárquica: a fase da construção dos níveis e das hierarquias e a fase da avaliação. Na fase de construção, a estrutura hierárquica forma uma árvore invertida, que vai descendo da meta de decisão para os critérios, subcritérios e alternativas, em sucessivos níveis (Saaty, 1990, 1991). Tal configuração pode ser vista na Figura 3.

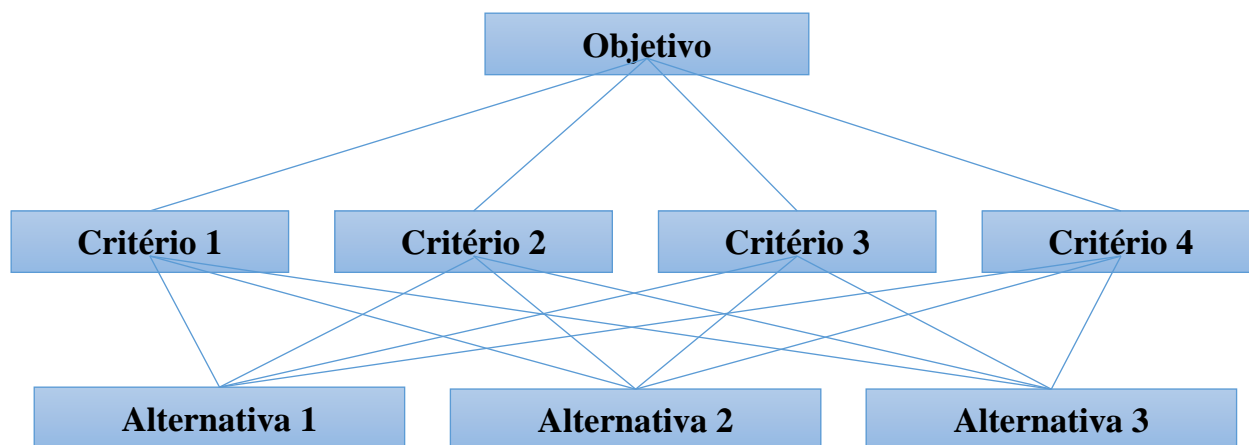


Figura 3. Estrutura hierárquica genérica de problemas de decisão (Saaty, 1990, 1991).

Após a hierarquização do problema, segue-se para a avaliação dos critérios e subcritérios estipulados. Nesta etapa serão dados pesos para cada critério ou subcritério e assim serão feitas análises comparativas entre eles determinando-se a importância relativa de cada um. Os pesos, neste trabalho, foram discriminados segundo a escala de julgamento descrita na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1. Escala de importância da análise hierárquica para comparação entre critérios.

Definição	Intensidade	Explicação
Menos importante	1/2	A atividade contribui menos para atingir o objetivo
Igual importância	1	A atividade contribui igualmente para atingir o objetivo
Mais importante	2	A atividade contribui mais para atingir o objetivo

A escala de importância pode variar, sendo que a proposta originalmente por Saaty difere da apresentada acima. Para este trabalho, optou-se por apenas três níveis de importância para tornar mais simples e mais objetiva a análise dos critérios. Cabe ressaltar o princípio da reciprocidade para a avaliação dos mesmos, ou seja, se um critério recebe um peso 2 se comparado com outro, este critério receberá um peso de 1/2 se comparado com aquele.

Para comparação dos subcritérios referentes às propriedades físicas e mecânicas, e durabilidade, utilizou-se outra escala de importância como pode ser vista na Tabela 2, visto que agora as alternativas são comparadas com cada uma das propriedades e itens de durabilidade estipulados.

Tabela 2. Escala de importância da análise hierárquica para avaliação das alternativas.

Definição	Intensidade	Explicação
Inadequado	1	A propriedade ou item de durabilidade não contribui para atingir o objetivo
Suficiente	2	A propriedade ou item de durabilidade contribui pouco para atingir o objetivo
Bom	3	A propriedade ou item de durabilidade contribui para atingir o objetivo
Muito bom	4	A propriedade ou item de durabilidade contribui muito para atingir o objetivo

Através do método de análise hierárquica para auxiliar na tomada de decisão e recolhimento de dados experimentais, determinou-se qual fibra é mais apropriada para ser utilizada em um caso específico de reforço em uma viga de concreto armado.

Os dados de alimentação referentes aos critérios e às opções de fibras da análise hierárquica foram obtidos através dos estudos realizados por (Garcez, 2007). Além disso, os resultados provenientes dos estudos com vigas reforçadas à flexão com a consideração dos três tipos de reforço com compósitos de fibras (carbono, aramida e vidro) realizados por (Garcez et al, 2007) foram utilizados para auxiliar na tomada de decisão.

A Figura 4 apresenta uma configuração do processo da análise hierárquica subdividida em objetivo, critérios e variáveis, além das alternativas. Com base nessa configuração, foram feitas as análises tanto dos critérios (custos, propriedades físicas e mecânicas e durabilidade) como das variáveis pertencentes a cada um. Além disso, cada variável foi analisada com as alternativas propostas (fibra de carbono, vidro e aramida) de modo a se obter a opção mais apropriada para compor o reforço.

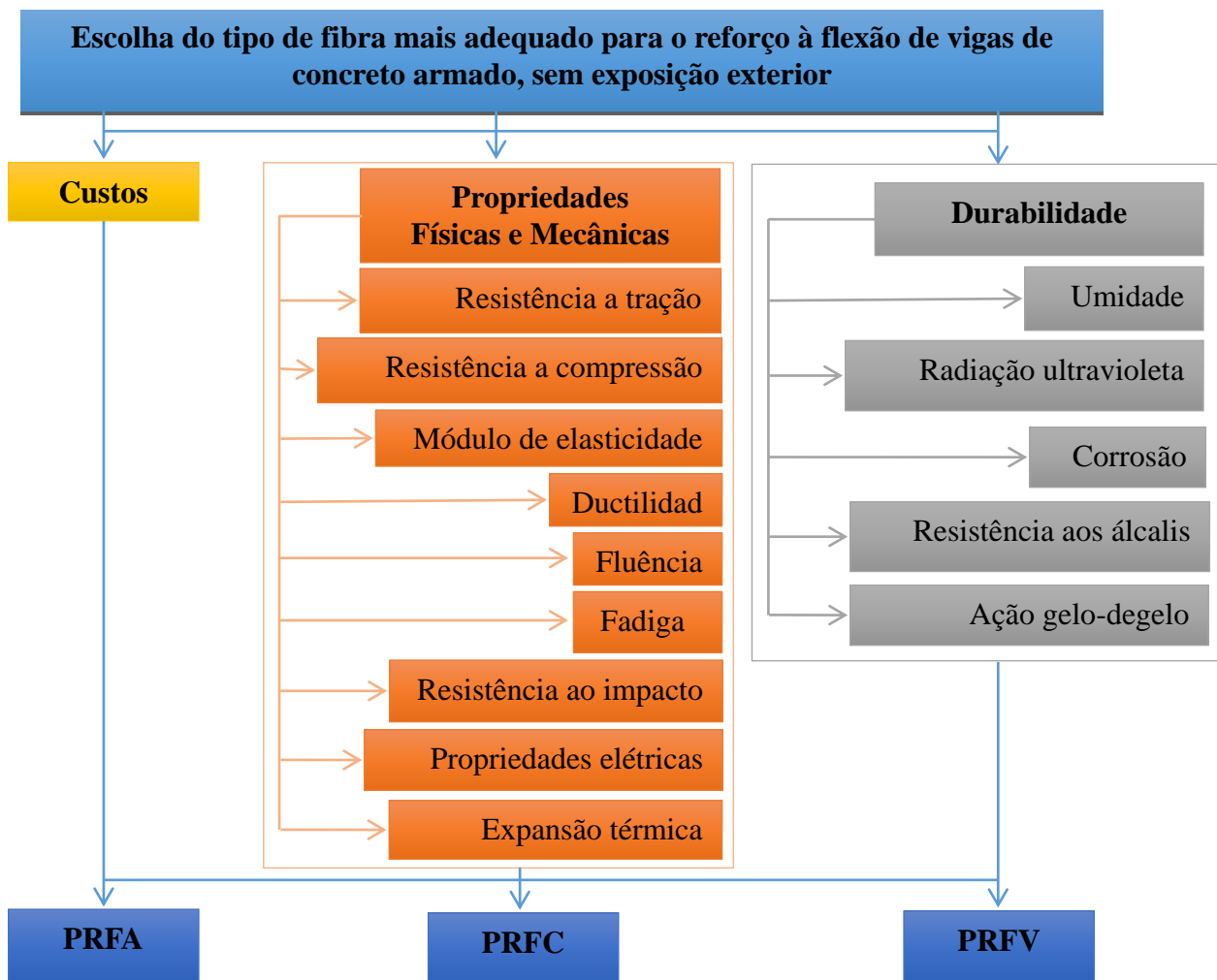


Figura 4. Configuração do processo da análise hierárquica.

3.2 Matriz de decisão.

Como o objetivo principal é se determinar qual o tipo de fibra mais adequado para ser aplicado no reforço estrutural de vigas de concreto armado, levando-se em conta as fibras de carbono, aramida e vidro, a matriz de decisão foi feita de forma a se avaliar os três critérios estabelecidos: custos, propriedades físicas e mecânicas, e durabilidade.

Quando se trata de custos, os valores a serem especificados se referem aos gastos para se obter cada fibra. Já, as propriedades físicas e mecânicas retratam o comportamento do polímero reforçado quanto às tensões e deformações sob certa situação de carregamento. O critério da durabilidade apresenta o comportamento do compósito frente a certas condições ambientais.

Para a determinação da importância relativa de cada critério, estabeleceu-se que os custos seriam menos importantes do que as propriedades mecânicas e a durabilidade. Foi conduzido desta forma para que, apesar dos gastos serem inevitáveis em um reforço estrutural, os mesmos não sejam considerados mais importantes do que a segurança estrutural. Como as propriedades mecânicas e a durabilidade influenciam no desempenho estrutural de um reforço com polímeros reforçados com fibras, tais critérios foram considerados com igual importância.

Tabela 3. Matriz de decisão e importância de cada critério.

Escala de importância		Custos	Propriedades Físicas e Mecânicas	Durabilidade	Total Parcial	Importância Relativa
Menos importante	1/2					
Igual importância	1					
Mais importante	2					
Custos		1	1/2	1/2	2	0,20
Propriedades Físicas e Mecânicas		2	1	1	4	0,40
Durabilidade		2	1	1	4	0,40
Total Geral (TG)					10	1,00

3.3 Cálculo do peso de cada variável.

3.3.1 Variáveis relacionadas ao critério das propriedades físicas e mecânicas. Neste item, cada variável relacionada às propriedades físicas e mecânicas das fibras foi confrontada com a outra de forma a se estabelecer uma priorização para garantir que o objetivo do estudo fosse atingido. Desta forma, valores da escala de comparação foram determinados para cada variável como pode ser visualizado na Tabela 4. Neste ponto, o raciocínio é exatamente o mesmo exposto no item anterior.

Tabela 4. Escalas de importância para variáveis relacionadas às propriedades físicas e mecânicas.

Escala de importância	Resistência à tração	Resistência à compressão	Módulo de elasticidade	Ductilidade	Fluência	Fadiga	Resistência ao impacto	Propriedades elétricas	Expansão térmica	Total da linha (TL)	Total da variável (TV)
Resistência à tração	1	2	1	1	1	2	2	2	2	14	0,15
Resistência à compressão	1/2	1	1/2	1/2	1/2	1/2	1	1	1/2	6	0,06
Módulo de elasticidade	1	2	1	1	1	2	2	2	2	14	0,15
Ductilidade	1	2	1	1	1	2	2	2	2	14	0,15
Fluência	1	2	1	1	1	2	2	2	2	14	0,15
Fadiga	1/2	2	1/2	1/2	1/2	1	2	2	1	10	0,11
Resistência ao impacto	1/2	1	1/2	1/2	1/2	1/2	1	1	1/2	6	0,06
Propriedades elétricas	1/2	1	1/2	1/2	1/2	1/2	1	1	1/2	6	0,06
Expansão térmica	1/2	2	1/2	1/2	1/2	1	2	2	1	10	0,11
Total Geral (TG)										94	1,00

As variáveis relacionadas à resistência à tração, módulo de elasticidade, ductilidade e fluência foram consideradas mais importantes do que as demais em função das necessidades a serem atendidas quando um reforço estrutural é executado. Desta forma, com a priorização destas variáveis, as tensões de tração, deformações excessivas e o comportamento frágil do elemento de concreto armado podem ser considerados de forma coerente.

3.3.2 Variáveis relacionadas ao critério da durabilidade. Neste item, a metodologia é idêntica à utilizada para a definição dos valores de importância relacionados às propriedades físicas e mecânicas. A confrontação das variáveis pode ser visualizada na Tabela 5.

Nesta análise, as variáveis de umidade, corrosão e resistência a álcalis foram determinadas como mais importantes do que as demais em função da maior frequência de acontecimento e da magnitude do dano que pode ser esperado na presença das mesmas ou descuido quanto à devida manutenção. A variável radiação ultravioleta foi considerada menos importante nesta comparação porque geralmente os reforços são aplicados com uma camada de acabamento, que os protege contra este fenômeno. Deste modo, este não é um fator determinante a ser considerado, já que os elementos podem, inclusive, ser protegidos superficialmente com algum outro material resistente a radiação UV, tal como uma pintura de poliuretano. Quanto à ação de gelo-degelo, considera-se que para uma avaliação voltada para o Brasil, que é o caso em questão, este critério deve ter pouca importância devido às condições climáticas aqui encontradas.

Tabela 5. Escalas de importância para variáveis relacionadas à durabilidade.

Escala de importância							
Menos importante	1/2						
Mesma importância	1						
Mais importante	2						
	Umidade	Radiação ultravioleta	Corrosão	Resistência aos álcalis	Ação gelo-degelo	Total da linha (TL)	Total da variável (TV)
Umidade	1	2	1	2	2	8	0,28
Radiação ultravioleta	1/2	1	1/2	1/2	1	3,5	0,12
Corrosão	1	2	1	1/2	2	6,5	0,22
Resistência aos álcalis	1/2	2	2	1	2	7,5	0,26
Ação gelo-degelo	1/2	1	1/2	1/2	1	3,5	0,12
Total Geral (TG)						29	1,00

3.4 Desempenho das alternativas.

Para se estabelecer a avaliação do desempenho de cada alternativa, estas foram analisadas em função de cada variável apresentada de forma que se possa determinar qual fibra é mais apropriada para atender ao requisito de segurança estrutural.

Os dados de módulo de elasticidade e resistência à compressão e à tração foram coletados de (Garcez et al, 2007). Deste modo, os resultados destas variáveis foram avaliados de forma quantitativa. Porém, alguns parâmetros, principalmente os que estão relacionados com a durabilidade, são caracterizados como qualitativos na medida em que são avaliados por observação e não resultam em valores numéricos. Esta é uma das vantagens da aplicação da análise hierárquica neste trabalho, ou seja, a possibilidade de interpretar conjuntamente grandezas quantitativas e qualitativas com uma visão sistêmica.

As Tabelas 6 e 7 mostram o desempenho dos três tipos de fibras com relação às propriedades físicas e mecânicas e à durabilidade.

Tabela 6. Desempenho das alternativas em relação às propriedades físicas e mecânicas.

Escala de importância	Atribuição de valores			Homogeneização dos dados			Peso da variável	Desempenho de cada alternativa		
	PRFC	PRFA	PRFV	PRFC	PRFA	PRFV		PRFC	PRFA	PRFV
Inadequado 1										
Suficiente 2										
Bom 3										
Muito Bom 4										
Resistência à tração (MPa)	3.400	2.800	1.517	1,00	0,82	0,45	0,15	14,89	12,27	6,65
Resistência à compressão (MPa)	2.652	560	834	1,00	0,21	0,31	0,06	6,38	1,35	2,01
Módulo de elasticidade (GPa)	227	124	72,4	1,00	0,55	0,32	0,15	14,89	8,14	4,75
Ductilidade	2	3	2	0,67	1,00	0,67	0,15	9,93	14,89	9,93
Fluência	4	2	1	1,00	0,50	0,25	0,15	14,89	7,45	3,72
Fadiga	4	2	1	1,00	0,50	0,25	0,11	10,64	5,32	2,66
Resistência ao impacto	3	4	3	0,75	1,00	0,75	0,06	4,79	6,38	4,79
Propriedades elétricas	2	4	4	0,50	1,00	1,00	0,06	3,00	6,00	6,00
Expansão térmica	3	3	4	0,75	0,75	1,00	0,11	8,25	8,25	11,00
Índice de desempenho							1,00	87,66	70,05	51,51

Como os valores inseridos para avaliação dos três tipos de fibras são valores quantitativos e qualitativos em função da escala de importância foi procedida a normalização dos dados. Para isso, em cada linha os valores atribuídos são divididos pelo seu maior valor. Por exemplo, no caso da alternativa relacionada com a expansão térmica, na homogeneização dos dados, os valores de 3, 3 e 4 foram divididos pelo maior valor entre eles, ou seja, por 4. Logo, na homogeneização destes dados, os coeficientes resultantes foram 0,75, 0,75 e 1,00, respectivamente.

Para determinar o desempenho de cada alternativa, bastou fazer o somatório da multiplicação do peso de cada variável, obtido na Tabela 5, pelo seu valor normalizado correspondente.

Tabela 7. Desempenho das alternativas em relação ao critério de durabilidade.

Escala de importância	Atribuição de valores			Homogeneização dos dados			Peso da variável	Desempenho de cada alternativa		
	PRFC	PRFA	PRFV	PRFC	PRFA	PRFV		PRFC	PRFA	PRFV
Inadequado 1										
Suficiente 2										
Bom 3										
Muito Bom 4										
Umidade	4	2	1	1,00	0,50	0,25	0,28	27,59	13,79	6,90
Radiação ultravioleta	4	2	4	1,00	0,50	1,00	0,12	12,07	6,03	12,07
Corrosão	2	4	4	0,50	1,00	1,00	0,22	11,21	22,41	22,41
Resistência aos álcalis	4	3	1	1,00	0,75	0,25	0,26	25,86	19,40	6,47
Ação gelo-degelo	4	4	4	1,00	1,00	1,00	0,12	12,07	12,07	12,07
Índice de desempenho							1,00	88,79	73,71	59,91

3.5 Atratividade econômica.

Através dos custos de aquisição unitários das fibras em análise, as fibras de carbono, aramida e vidro podem ser avaliadas segundo o critério de custos e dessa forma pode ser estabelecida uma competitividade econômica entre estes materiais. Cabe ressaltar que quanto maior o custo unitário, a atratividade econômica se torna menor e conseqüentemente a competitividade do material também diminui (Tabela 8).

Os valores de competitividade econômica foram determinados segundo a Equação 1.

$$\text{COMPETITIVIDADE ECONÔMICA} = \frac{\text{ATRATIVIDADE ECONÔMICA DA FIBRA}}{\text{MAIOR VALOR DE ATRATIVIDADE ECONÔMICA}} \times 100 \quad (1)$$

Tabela 8. Competitividade econômica das fibras de carbono, aramida e vidro.

Alternativa	Custos (US\$/m ²)	Atratividade econômica (1/US\$)	Competitividade Econômica
Fibra de Carbono	50,00	0,02	20,00
Fibra de Aramida	24,00	0,04	41,67
Fibra de Vidro	10,00	0,10	100,00

3.6 Avaliação final do desempenho.

Após as etapas de elaboração da matriz de decisão, cálculo do peso de cada variável e avaliação do desempenho de cada alternativa com relação ao custo, propriedades físicas e mecânicas e durabilidade, estabeleceu-se o cálculo da avaliação de desempenho final de cada alternativa (Tabela 9).

Os coeficientes da linha da importância relativa foram determinados na Tabela 3. Na coluna dos custos, tais valores são provenientes da Tabela 8 em que foi feita a análise da atratividade econômica de cada material.

Na coluna do critério das propriedades físicas e mecânicas, os valores foram estabelecidos na Tabela 6, já os valores referentes ao critério da durabilidade foram extraídos da Tabela 7.

Com estes valores, pode-se realizar uma avaliação final das alternativas sendo o valor final de avaliação de desempenho a soma, para cada tipo de fibra, dos valores referentes ao critério multiplicado pela respectiva importância relativa conforme Equação 2.

Tabela 9. Avaliação final das alternativas.

Alternativa → Importância Relativa ↓	Custo	Propriedades Físicas e Mecânicas	Durabilidade	Avaliação Final
	0,20	0,40	0,40	
PRFC	20,00	87,66	88,79	74,58
PRFA	41,67	70,05	73,71	65,84
PRFV	100,00	51,51	59,91	64,57

$$PRF = \text{Custo} \times 0,20 + \text{Propriedades físicas e mecânicas} \times 0,40 + \text{Durabilidade} \times 0,40 \quad (2)$$

$$PRFC = 20,00 \times 0,20 + 87,66 \times 0,40 + 88,79 \times 0,40 = 74,58$$

$$PRFA = 41,67 \times 0,20 + 70,05 \times 0,40 + 73,71 \times 0,40 = 65,84$$

$$PRFV = 100,00 \times 0,20 + 51,51 \times 0,40 + 59,91 \times 0,40 = 64,57$$

Observa-se que o polímero reforçado com fibras de carbono apresentou um desempenho superior ao obtido pelos compósitos constituídos pelas fibras de aramida e vidro em relação ao critério das propriedades físicas e mecânicas. As variáveis de resistência à tração, módulo de elasticidade e fluência, com índices de 14,89 para os três itens, contribuiu para que a fibra de carbono obtivesse melhor desempenho final.

Em relação ao critério da durabilidade, pode-se dizer que as três fibras apresentaram comportamento semelhante com um desempenho um pouco superior novamente da fibra de carbono, seguida pela fibra de vidro e aramida.

No estudo experimental realizado por (Garcez et al, 2007) foram ensaiadas vigas de concreto armado reforçadas à flexão com polímeros reforçados com fibra de carbono (CFB), polímeros reforçados com fibras de aramida (AFB) e polímeros reforçados com fibras de vidro (GFB), conforme descrito na Tabela 10.

Tabela 10. Programa experimental (Garcez et al, 2007).

Viga	Tipo de Fibra	Número de Camadas	Incremento de carga (dimensionamento) %
CB	-	-	-
CFB_01	aramida	01	25
AFB_01	carbono	01	25
CFB_02	carbono	02	45
AFB_02	aramida	02	45
GFB_02	vidro	03	45

Os resultados do programa experimental mostram que para um incremento de carga de 45% é necessária a utilização de mais camadas de compósitos de fibras de vidro, reflexo das suas propriedades mecânicas, principalmente o módulo de elasticidade, consideravelmente inferior aos das fibras de aramida e carbono, como evidenciado na Tabela 6.

Os resultados de (Garcez et al, 2007) em relação ao incremento de carga e o respectivo deslocamento, medido na porção central da viga, são apresentados na Figura 5, onde é possível confirmar com dados experimentais o resultado obtido através do método da análise hierárquica, principalmente no que se refere às propriedades físicas e mecânicas.

Neste estudo, foi utilizado para a avaliação o custo unitário dos materiais e não o custo global. Devido à necessidade de mais camadas de fibras de vidro do que de fibras de carbono e aramida, para um mesmo nível de reforço, o custo pode aumentar e, no final da avaliação, até mesmo superar os de um reforço com fibra de carbono.

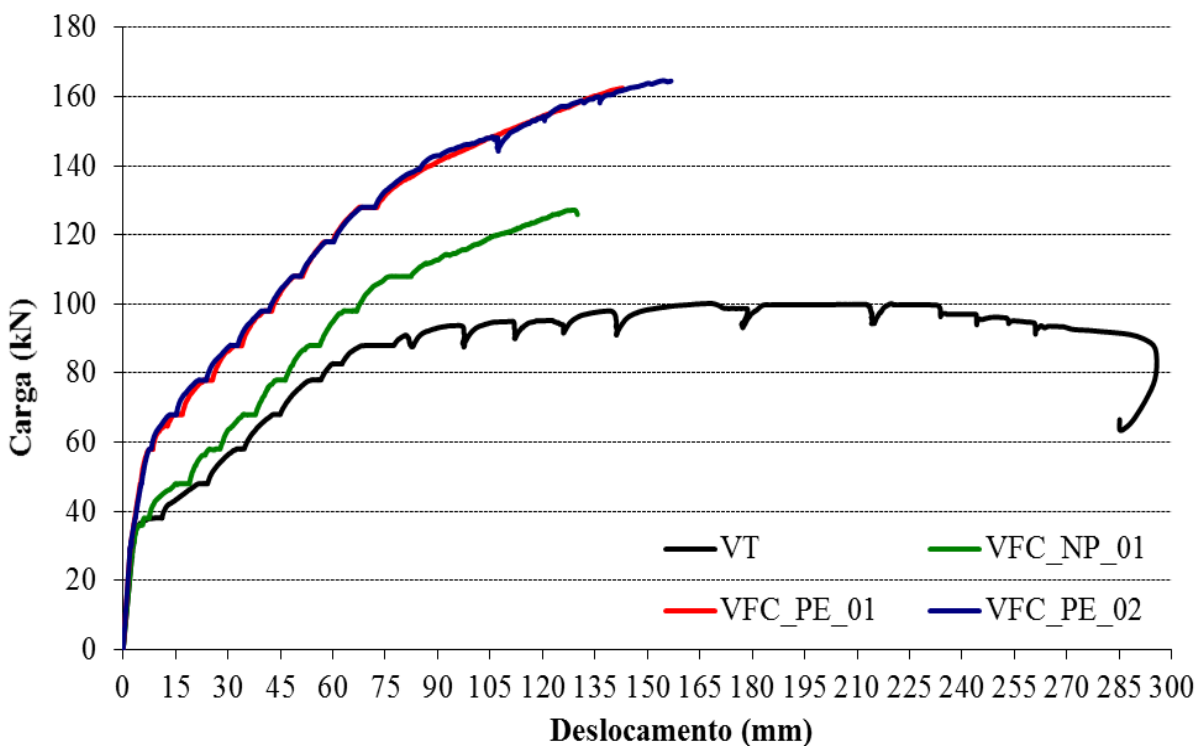


Figura 5. Cargas e deslocamentos obtidos para os protótipos ensaiados (Garcez et al, 2007).

4. CONCLUSÕES

A fibra de carbono foi a mais indicada para ser utilizada no reforço à flexão de vigas de concreto armado considerando as características de projeto e especificidades propostas neste estudo, apesar do alto investimento inicial necessário.

Apesar do polímero reforçado com fibras de carbono apresentar excelentes propriedades, uma análise global e profunda de todas as variáveis envolvidas em cada projeto de reforço estrutural deve ser feita de modo a escolher o material mais adequado conforme as condições de exposição e carregamento, que são particulares a cada projeto de reforço. A análise dos custos, condições de exposição e níveis de reforço devem ser avaliados de modo a ser feito um reforço que seja viável técnica e economicamente, e que apresente adequada durabilidade.

A aplicação da técnica de interpretação de resultados denominada análise hierárquica se mostrou muito útil para a tomada de decisão, podendo ser considerada adequada para estudos que exijam uma tomada de decisão entre diferentes sistemas de reforço com polímeros reforçados com fibras.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Concrete Institute (2002), *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures: ACI 440.2R-02*.

American Concrete Institute (2008), *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures: ACI 440.2R-08*.

Costa, H. G. (2002), *Introdução ao método de análise hierárquica* (Niterói, Brasil).

Garcez, M. R., Meneghetti, L. C., Silva Filho, L. C. P. (2007), “*Verificação da possibilidade de variação das fibras formadoras do compósito nos sistemas PRF aplicados no reforço à flexão de vigas de concreto armado*”, *Ciência & Engenharia* 16: pp. 107-114.

Garcez, M. R. (2007), “*Alternativas para melhoria no desempenho de estruturas de concreto armado reforçadas pela colagem de polímeros reforçados com fibras*”, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Hearing, B., Buyukosturk, O. (2000), “*Delamination in Reinforced Concrete Retrofitted with Fiber Reinforced Plastics*”, Massachusetts Institute of Technology.

Intelligent Sensing for Innovative Structures - ISIS (2003), *Educational Modulus about FRP*, Winnipeg.

Meier, U. (2005), “*Design and rehabilitation of concrete structures using advanced composite materials*”. Proc., Pré-Congresso Latino-Americano de Patologia da Construção, Porto Alegre, 2005, CD-ROM.

Saaty, T. L. (1990), “*How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process*”, *European Journal of Operational Research* 48: pp. 9-26.

Saaty, T. L. (1991), *Método de Análise Hierárquica* (São Paulo, Brasil).

S&P Clever Reinforcement Company (2006), *Design Guide Line for S&P FRF Systems*, Brunnen.