

# ASPECTOS DA MODELAGEM COMPUTACIONAL TRIDIMENSIONAL DE CABOS DE FIBRAS ÓPTICAS UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

**Carlos A. Vasconcellos<sup>\*</sup>, Mildred B. Hecke<sup>\*</sup> e Roberto D. Machado<sup>\*</sup>**

<sup>\*</sup> Centro de Estudos de Engenharia Civil Professor Inaldo Ayres Vieira  
Universidade Federal do Paraná  
Caixa Postal 19011 – CEP 81531-990 – Curitiba, PR, Brasil  
e-mail: cesec@cesec.ufpr.br, página web: <http://www.cesec.ufpr.br>

## **Resumo.**

Este trabalho visa discutir alguns aspectos da modelagem computacional tridimensional de um cabo de fibras ópticas pelo Método dos Elementos Finitos. O cabo óptico estudado no presente trabalho é do tipo “*loose tube*”, com 6 fibras em cada tubo de proteção (total de 36 fibras ópticas monomodo), onde tais tubos são reunidos ao longo de uma helicóide em torno do elemento estrutural central. Foi utilizado o programa ANSYS, versão 5.3, para discretizar a estrutura do cabo pelo Método dos Elementos Finitos. Um modelo preliminar foi desenvolvido considerando-se o cabo como um problema de estado plano de deformações. Em seguida, utilizando-se alguns resultados da análise plana, foi criado um modelo sólido tridimensional. Aspectos a respeito desta modelagem serão discutidos no presente trabalho, visando fornecer subsídios para uma modelagem mais completa no futuro.

**Palavras chave:** Cabos Ópticos, Análise Numérica, MEF.

## **1. INTRODUÇÃO**

Cabos ópticos (Keiser, 1991) são dispositivos utilizados em sistemas de comunicações de dados e devem possuir características mecânico-estruturais que os permitam transmitir informações com baixa perda de sinal. Os componentes do cabo óptico estudado neste trabalho serão apresentados no item 2.

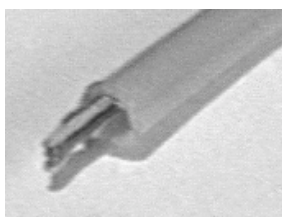
Quando submetido a carregamentos externos, seja compressão diametral, flexão, variação de temperatura etc., os cabos podem sofrer deformações excessivas que serão transmitidas às fibras ópticas. Tal comportamento degrada e compromete a transmissão dos sinais através das fibras. Deste modo, é de fundamental importância o controle e a limitação das deformações dos componentes estruturais que compõem o cabo óptico.

Este trabalho procura discutir aspectos da modelagem computacional tridimensional de um cabo de fibra óptica, submetido a esforços de compressão diametral, pelo Método dos Elementos Finitos. Um estudo desta natureza se faz necessário por algumas razões principais: primeiro, o comportamento mecânico-estrutural do cabo tem influência em sua capacidade de transmissão de dados; segundo, tem-se um emprego crescente de cabos ópticos nas empresas de telecomunicações. Estes fatos fazem com que a otimização no projeto dos cabos ópticos seja de fundamental importância para as indústrias que os produzem.

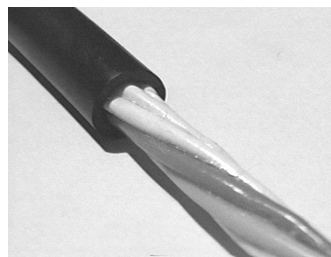
## 2. CARACTERIZAÇÃO DA ESTRUTURA DE UM CABO ÓPTICO

A fibra óptica é um meio através do qual informações luminosas são transmitidas. Consiste em material dielétrico, essencialmente sílica pura ( $\text{SiO}_2$ ), dopada com pequena quantidade de outros materiais. Possui uma estrutura cilíndrica formada por uma região central, núcleo (*core*), por onde a informação luminosa transita, envolta por uma camada, denominada casca, composta de material de menor índice de refração, onde tal sinal é refletido.

As fibras apresentam baixa resistência mecânica. Curvaturas acentuadas fazem com que o sinal luminoso perca intensidade, fenômeno conhecido como atenuação. Por este motivo, elas precisam ter proteção mecânica. No cabo óptico em estudo, esta proteção é oferecida por tubos do tipo “*loose*”, caracterizados por terem as fibras ópticas soltas em seu interior. A figura 1 mostra fibras ópticas e o tubo de proteção tipo “*loose*”.



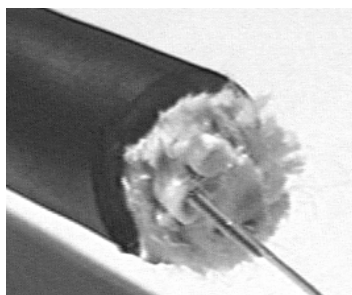
**Figura 1.** Fibras ópticas e tubo “*loose*” de proteção



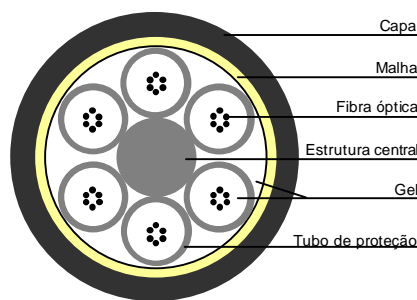
**Figura 2.** Tubos “*loose*” de proteção reunidos em torno do elemento estrutural central

Cada um dos tubos de proteção “*loose tube*” que compõem o cabo óptico em estudo abrigam fibras ópticas embebidas em um fluido gelatinoso impedindo penetração de umidade. Os tubos, por sua vez, são reunidos em torno de um elemento estrutural central, como pode ser visto na figura 2.

Este conjunto, elemento central e tubos de proteção (núcleo óptico), é envolvido, no modelo de cabo em estudo, uma malha de material fibroso resistente à tração (elemento de tração) e uma capa de material plástico, como ilustrado na figura 3



**Figura 3.** Núcleo óptico, elemento de tração e capa



**Figura 4.** Representação da estrutura do cabo tipo *loose* em estudo

Existem diversos modelos estruturais de cabos ópticos (configuração tipo *tight*, *loose* ou *ribbon*) que dão proteção mecânica às fibras ópticas e tais estruturas são projetadas de acordo com o uso que o cabo terá. O presente trabalho estuda as estruturas de cabos de configuração *loose*, cuja geometria é representada esquematicamente na figura 4.

### 3. ASPECTOS DO MODELO COMPUTACIONAL ADOTADO

O cabo óptico foi discretizado pelo Método dos Elementos Finitos, utilizando-se o programa ANSYS, versão 5.3, onde, devido à complexidade do cabo, vários tipos de elementos foram considerados. Conforme explicado a seguir, dois tipos de análises foram realizadas – uma plana (estado plano de deformações) e outra tridimensional. Os componentes estruturais do cabo foram modelados por elementos finitos PLANE42, nos modelos em estado plano de deformações e por elementos SOLID45 nos modelo tridimensionais. Elementos de contato (Johnson, 1987) foram empregados para representar a interação entre os diversos tubos do cabo, o elemento estrutural central e a capa do cabo.

O principal desafio nesta etapa do trabalho é simular a interação entre os componentes estruturais do cabo óptico através dos elementos de contato. A escolha correta das constantes características destes elementos é uma fase crucial na análise.

Com este objetivo e visando algumas simplificações no modelo computacional, o estudo do cabo seguiu as seguintes etapas: Primeiro, o cabo óptico foi modelado no estado plano de deformações, desprezando-se o efeito da helicóide. Segundo, para considerar o efeito da reunião dos tubos de proteção em forma de hélice em torno do elemento central, foi criado um modelo tridimensional para o cabo óptico.

#### 3.1. Análise do cabo óptico em estado plano de deformações

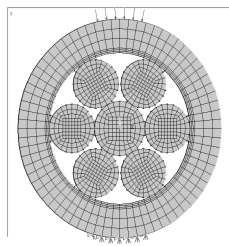
Em uma primeira etapa da análise, um modelo computacional do cabo óptico foi criado, considerando-o em estado plano de deformações.

Esta hipótese simplificadora negligencia o efeito da reunião dos tubos de proteção se dar de maneira helicoidal em torno do elemento central, ou seja, considera que a seção transversal do cabo e suas deformações são as mesmas em todo seu comprimento.

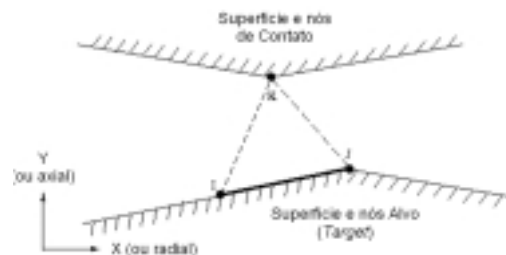
As propriedades de material e geometria do modelo são aqueles característicos do cabo, à exceção da rigidez equivalente dos tubos de proteção. Estes são agora representados por cilindros maciços com rigidez equivalente.

Os componentes estruturais do cabo foram modelados por elementos finitos PLANE42 e os contatos entre tubo de proteção/capa, tubo de proteção/tubo de proteção e tubo de proteção/elemento central foram modelados por elementos CONTAC48.

Este elemento de contato funciona com um algoritmo que procura, de maneira incremental, a posição de equilíbrio entre duas superfícies, superfície de contato e superfície alvo, que podem vir a entrar em contato. O elemento apresenta grande sensibilidade às suas constantes características (rigidez normal e tangencial) bem como às propriedades dos materiais que podem entrar em contato e às cargas atuantes no sistema. A figura 6 ilustra um elemento plano de contato, seus nós (i, j e k), seu sistema de coordenadas e as superfícies envolvidas no problema, contato e alvo.



**Figura 5.** Modelo computacional plano do cabo óptico



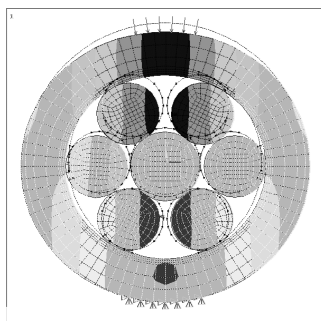
**Figura 6.** Elemento plano de contato (CONTAC48)

Na base do cabo, os apoios restringiram as translações nas direções  $x$  e  $y$ . No topo do cabo, foi aplicada uma carga diametral de pressão de modo a simular um ensaio de compressão diametral.

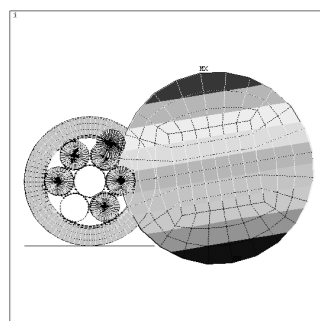
Tal modelo é afetado pela não linearidade do elemento de contato, havendo um grande custo computacional para sua solução. Além disto, os parâmetros necessários para caracterizar os elementos de contato, isto é, a rigidez normal e tangencial, podem variar em uma larga faixa de valores. Dependendo destes valores, chega-se à convergência correta (solução do problema), convergência incorreta (resultados incorretos) ou divergência (solução não encontrada).

Esta etapa da análise requer grande esforço computacional, uma vez que a escolha das constantes não segue parâmetros rígidos. O software Ansys sugere uma grande faixa de valores admissíveis para as constantes. O modelo plano do cabo convergiu corretamente com a rigidez normal de contato assumindo valores na ordem de grandeza da rigidez média dos componentes estruturais do mesmo. Ainda no modelo plano, a rigidez tangencial do contato deve assumir valores da ordem de um centésimo da rigidez normal.

Pode-se observar um resultado qualitativamente correto no modelo computacional plano do cabo óptico, onde os esforços aplicados no topo do cabo foram transmitidos através da capa, para os tubos de proteção. Estes sofreram um rearranjo e a simetria é verificada. Uma maior aplicação de carga leva a uma maior deformação dos tubos de proteção. A figura 7 ilustra a deformação do modelo plano do cabo óptico.



**Figura 7.** Convergência correta do modelo computacional plano



**Figura 8.** Convergência incorreta do modelo computacional plano

A figura 8 representa uma convergência incorreta do modelo, obtida com a mudança nas constantes características do elemento de contato. O resultado encontrado nem sequer pode ser interpretado fisicamente.

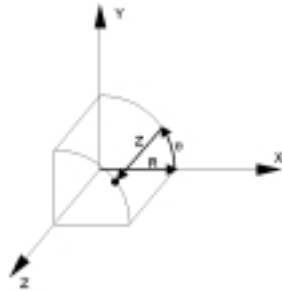
O modelo em estudo pode representar melhor o cabo óptico quando incorporar o tubo de proteção real (incluindo os elementos finitos que modelam o gel e as fibras ópticas).

Em seguida, com a finalidade de considerar a reunião helicoidal dos tubos de proteção em torno do elemento central, criou-se um modelo sólido tridimensional. Nesta etapa, com vistas a reduzir o custo computacional, foram utilizados alguns conceitos desenvolvidos na análise no estado plano de deformações (tubo equivalente).

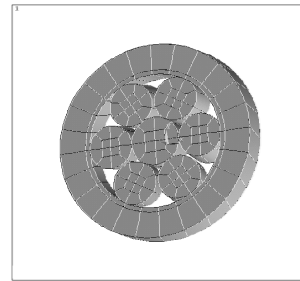
### 3.2. Análise tridimensional do cabo óptico

A partir da seção transversal do cabo analisada no item 3.1, o cabo foi modelado geometricamente para um passo da helicóide (Huang, 1994) de 100 mm. Cada incremento na direção longitudinal ( $dz$  no sistema cilíndrico de coordenadas) do cabo foi gerado de tal modo que os incrementos na rotação ( $d\theta$ ) perfizessem um passo completo ao final dos 100 mm. As

demais dimensões de cada componente foram usadas de acordo com dados de projeto do cabo. A figura 9 representa o sistema cilíndrico de coordenadas e a figura 10, um incremento longitudinal  $dz$  da modelagem espacial do cabo óptico.



**Figura 9.** Sistema cilíndrico de coordenadas empregado na modelagem espacial do cabo

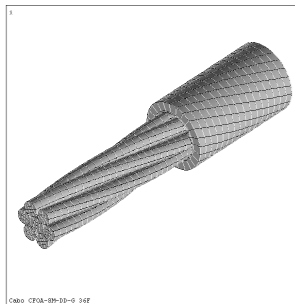


**Figura 10.** Incremento longitudinal ( $dz$ ) na seção transversal do cabo óptico

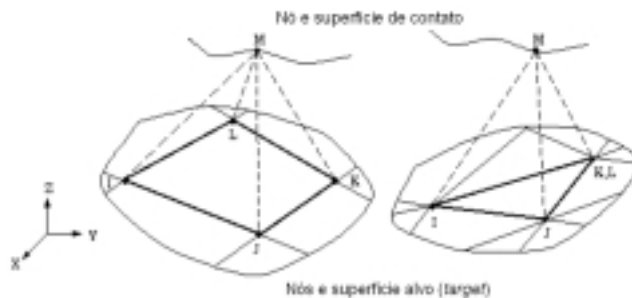
Na etapa de implementação da geometria do problema tridimensional já se verifica uma necessidade de se trabalhar com equipamentos de grande poder computacional. A versão 5.3 do Ansys gera um arquivo de 276 MB para representar o modelo geométrico do cabo. Tal modelo encontra-se na figura 11.

Para obtenção de resultados (deformação do cabo óptico), este modelo é muito caro computacionalmente. Nesta etapa, optou-se por uma malha de elementos finitos menos refinada (figura 13), com elementos estruturais lineares tridimensionais SOLID45 (paralelepípedo de 8 nós, com 3 graus de liberdade em cada nó – translação nas direções x, y e z) em um quarto do passo da hélice de reunião.

A solução do problema tridimensional depende, assim como no estado plano de deformações, das constantes de rigidez normal e tangencial do elemento de contato, no caso, CONTAC49 (figura 12) . É oportuno salientar que estas constantes são diferentes daquelas utilizadas no modelo em estado plano.



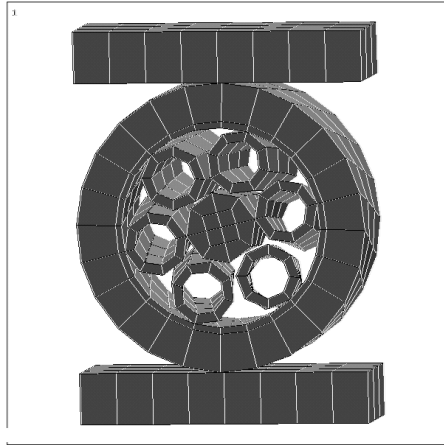
**Figura 11.** Modelo tridimensional do cabo óptico



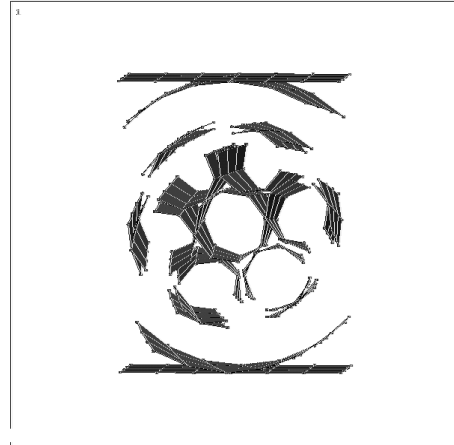
**Figura 12.** Elemento de contato tridimensional (CONTAC49)

Assim como no modelo plano, o algoritmo do elemento de contato tridimensional procura a posição de equilíbrio entre duas superfícies, mas o custo computacional é maior. Isto porque o elemento finito CONTAC49 requer que os elementos estruturais que modelam as superfícies, de contato e alvo, sejam lineares. Estes elementos, por sua vez, exigem uma malha de elementos finitos estruturais refinada o suficiente para garantir a precisão da solução

do problema, o que aumenta consideravelmente o tamanho dos sistemas de equações e arquivos de dados manipulados.



**Figura 13**  
Modelo tridimensional da estrutura do cabo óptico



**Figura 14**  
Elementos de contato empregados no modelo

A tabela 1 relaciona os valores adotados nos modelos computacionais para módulos de elasticidade e coeficiente de Poisson para os materiais que entram em contato

**Tabela 1.** Caracterização dos materiais empregada no modelo tridimensional

Elemento estrutural	Módulo de elasticidade (E=N/mm <sup>2</sup> )	Coefficiente de Poisson (ν)
Capa	681	0.3
Aramida	50	0.1
Tubo de proteção	758	0.3
Elemento central	53.700	0.3

#### 4. RESULTADOS

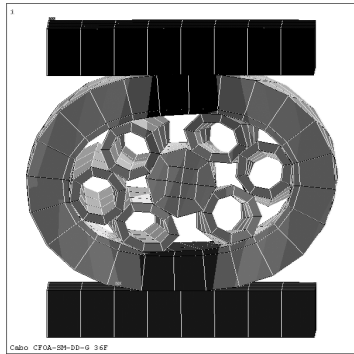
Os resultados (deformação do cabo óptico) obtidos com o modelo tridimensional podem ser considerados satisfatórios, uma vez que representam qualitativamente bem o comportamento do cabo óptico. Além disto, o modelo computacional criado serve como parâmetro de comparação entre o comportamento do cabo atualmente construído e novos projetos de cabos (com variações na geometria e nos materiais).

Melhores resultados quantitativos dependem, entretanto, de alguns fatores: a geração de uma malha mais refinada no interior do cabo (na modelagem dos tubos de proteção e do elemento estrutural central); a consideração da ortotropia do componente estrutural de tração; a incorporação do gel e das fibras óticas no interior do tubo de proteção e a consideração das não-linearidades geométricas e de materiais.

No momento, novos estudos estão sendo realizados com outros elementos de contato da versão 5.5 do software Ansys®, que admitem elementos estruturais quadráticos na modelagem das superfícies de contato.

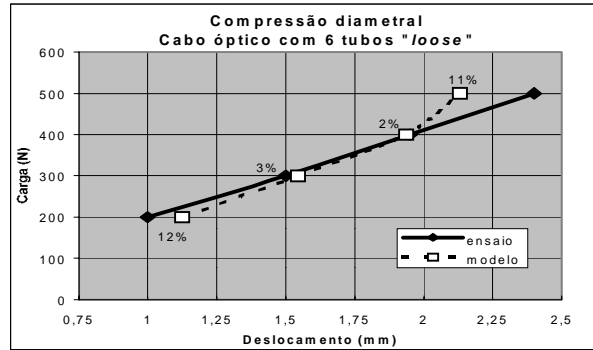
O modelo ilustrado na figura 13 foi submetido a diversas cargas de compressão diametral e suas respectivas deformações foram comparadas com ensaios realizados no cabo óptico. A figura 15 representa a situação deformada do cabo óptico após a aplicação de uma carga de

500 N. Observar que alguns tubos de proteção sofrem um esmagamento maior do que outros e que a camada de aramida é mais deformável, já que ela não tem rigidez na direção radial.



**Figura 15.**

Estrutura do cabo óptico deformada



**Figura 16.**

Gráfico comparativo dos deslocamentos verticais máximos sofridos pelo cabo óptico

A tabela 1 e o gráfico da figura 16 comparam os valores de deslocamento radial máximo sofrido pela estrutura do cabo óptico. Tal deslocamento é sofrido pelo nó superior da capa do cabo, na posição onde sofre a aplicação do carregamento de compressão diametral.

Os valores numéricos obtidos com o modelo computacional estão no entorno dos valores obtidos nos ensaios de laboratório. O erro percentual encontra-se aceitável (na ordem de 3%) nas cargas de trabalho às quais o cabo óptico é submetido. Entretanto, observa-se o ganho de rigidez do modelo computacional (em relação ao ensaio) com o aumento da carga aplicada. Para amenizar este efeito, deve-se incorporar as sofisticções ao modelo computacional (tais como não-linearidade geométrica e de material, ortotropia do componente estrutural de tração, refino da malha de elementos finitos no interior do cabo e inclusão do gel e fibras ópticas no interior dos tubos de proteção).

**Tabela 2.** Deslocamentos verticais do cabo óptico

Carga (N)	Deslocamento (mm)				
	1dz	2dz	3dz	4dz	5dz
200	1,191	1,163	1,124	1,066	1,029
300	1,672	1,595	1,544		1,405
400		1,909	1,935		
500			2,130		

Os valores empregados no gráfico da figura 16 são referentes ao modelo computacional com 3 incrementos longitudinais dz.

## 5. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

O Método dos Elementos Finitos empregado em problemas de contato mostrou-se bastante apropriado para modelar a estrutura do cabo óptico proposto neste trabalho. Tem-se exatamente a situação de restrição à penetração de um componente estrutural no outro, mas com a liberdade de escorregar quando em contato.

Tendo em vista a complexidade da estrutura do cabo óptico, tanto geométrica quanto dos materiais que a compõem, a maior dificuldade em um trabalho desta natureza é a determinação das constantes características do problema de contato.

Os resultados obtidos representam qualitativamente bem o comportamento do cabo óptico. Uma melhor representação quantitativa deverá ser obtida com a elaboração de modelos mais completos. O elemento estrutural de tração (material fibroso aderente à capa do cabo óptico) deverá ser considerada como material ortotrópico, com suas diferentes rijezas (direção radial e direção longitudinal) sendo caracterizadas corretamente. Os materiais que compõem a capa do cabo óptico e o tubo de proteção das fibras ópticas devem ser caracterizados considerando o fato de que eles não têm um comportamento linear, a partir de curvas tensão x deformação que os caracterizem.

Além do aperfeiçoamento do modelo estrutural, os componentes do interior do tubo de proteção, gel e fibras ópticas (Tormena, 1999), devem ser incluídos. Este último aperfeiçoamento do modelo computacional permitirá a avaliação dos efeitos do carregamento externo aplicado ao cabo óptico sobre a fibra óptica.

Uma vez aprimorado o modelo computacional do cabo óptico, uma etapa seguinte do trabalho, prevê a aplicação de um carregamento de variação de temperatura ao mesmo, que é um problema que também afeta a sua capacidade de transmissão de dados.

## 6. AGRADECIMENTOS

À Furukawa Industrial S.A. Produtos Elétricos pela colaboração técnico-financeira no desenvolvimento do trabalho.

## 7. REFERÊNCIAS

- Ansys User's Manual for Revision 5.4, 1997, Swanson Analysis System.
- Björklund, S. e Sören, A., 1994, "A Numerical Method for Elastic Contacts Subjects to Normal and Tangencial Loading", *Wear*, 179, 117-122.
- Johnson, K.L., 1987, "Contact Mechanics". Cambridge : Cambridge University Press..
- Gupta , P. K e Walowit, J. A., 1974, "Contact Stresses between an Elastic Cylinder and a Layered Elastic Solid" , *ASME Journal of Lubrification Tecnology*, 250-257.
- Horska, J., 1994, "Design of Loose Tube Fiber Optic Cable with Adjusted Contraction and Strain Windows". *International Wire & Cable Symposium*, 50-58.
- Huang, X. and Vinogradov, O., 1994, "Analysys of Dry Friction Hysteresis in a Cable under Uniform Bending", *Structural Engineering and Mechanics*, 63-80.
- Keiser, G., 1991, "Optical Fiber Communications", McGraw-Hill.
- Tormena, F. V. et ali., 1999, "Modelagem Computacional Bidimensional de Cabos Ópticos Utilizando o Método dos Elementos Finitos.", *Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR., Brasil, 90p.*
- Vasconcellos, C. A. M. et ali, 1999, "Modelagem Computacional Tridimensional da Estrutura de um Cabo de Fibras Ópticas Utilizando o Método dos Elementos Finitos". *Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR., Brasil, 58p.*