



**XXII SNPTTE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

BR/GLT/22  
13 a 16 de Outubro de 2013  
Brasília - DF

**GRUPO – III**

**GRUPO DE ESTUDO DE LINHAS E TRANSMISSÃO - GLT**

**APRIMORAMENTO DA METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE EXPANSÃO TÉRMICA EM CABOS DE LINHA DE TRANSMISSÃO E DISTRIBUIÇÃO – COMPARAÇÃO DE MÉTODOS**

**Marcos José Mannala (\*)**  
**LACTEC**

**Carlos E. L. Mattos**  
**LACTEC**

**Gabriel R. do Amaral**  
**LACTEC**

**Oswaldo H. de Souza Jr.**  
**COPEL/UTFPR**

**RESUMO**

No XX SNPTTE foi apresentado o tema “METODOLOGIA DE ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE DILATAÇÃO TÉRMICA DE CABOS CONDUTORES PARA LINHAS DE TRANSMISSÃO”, metodologia esta baseada na tração constante do condutor. O trabalho atual propõe uma nova metodologia, adotando-se comprimento constante de vão.

A adoção da tração variável na amostra ensaiada está mais próxima do real, pois as estruturas de ancoragem e suspensão em uma linha são fixas. O comportamento mecânico dos condutores, quando adotada tração constante ou variável, revelam diferentes resultados no ponto de inflexão térmica das amostras.

**PALAVRAS-CHAVE**

Coeficiente de dilatação térmica, cabo de alumínio nu, metodologia de ensaio, ensaios em cabos, ensaios automatizados.

**1.0 INTRODUÇÃO**

Há mais de uma década e meia, o Instituto de Pesquisa para o Desenvolvimento (LACTEC) vem realizando ensaios para fins da determinação do coeficiente de dilatação em cabos condutores para linhas de distribuição e transmissão de energia elétrica. Na metodologia adotada atualmente, traciona-se o condutor à tração usada no projeto da linha e, enquanto a amostra é aquecida com corrente elétrica, mantém-se a tração inicial por meio de um controle de carga.

Na prática, porém, as linhas não possuem tração constante; o que é constante é o comprimento do vão entre as ancoragens. Este ensaio foi desenvolvido a pedido dos fabricantes, que solicitavam mudar a forma de se realizar o ensaio. Surgiu assim a alternativa de ensaio com comprimento constante do vão entre ancoragens.

Com a adoção dessa nova metodologia, procurou-se uma maneira alternativa para a determinação do coeficiente de dilatação térmica, tendo em vista a aplicação deste parâmetro no cálculo das flechas do cabo condutor durante sua operação em altas temperaturas. Para tal, foi estabelecida como premissa a obtenção deste parâmetro simultaneamente à aplicação da corrente elétrica, que ocasiona o aumento da temperatura do condutor, e a aquisição conjunta da tração e da catenária no vão de ensaio. Tendo controle desta variável, pode-se calcular com precisão a altura cabo-solo, garantindo maior segurança.

Neste artigo, é feita uma comparação entre os resultados de ensaios em amostras de cabo CAA 4/0 – Penguin, quando utilizada as duas metodologias.

(\*) BR 116 – km 98, nº 8813, nº 123 – sala 132 - Bloco Campus UFPR – CEP 81.531-980, Curitiba, PR – Brasil.  
Tel: (+55 41) 3361-6259 – Cel.: (+55 41) 8439-4427 – Email: mannala@lactec.org.br

Quanto à configuração dos equipamentos utilizados para comparação das metodologias, foram necessárias poucas alterações. A diferença principal entre as metodologias está na forma de controle da tração e nos pontos de monitoramento do alongamento das amostras ensaiadas. Quanto ao programa desenvolvido para essa nova etapa, este possui diferenças na sequência de preparação das amostras, execução e cálculos, tendo em vista que a medição principal é a da catenária no eixo vertical, que será relacionada com a diferença de comprimento da amostra com temperatura inicial e final. De comum, o controlador de corrente é em malha fechada, possibilitando que a cada meio segundo este parâmetro seja constantemente corrigido. A temperatura é medida ao longo da amostra, levando-se em consideração os gradientes de temperatura do condutor.

Durante a realização dos ensaios, para as duas metodologias, pode-se visualizar o comportamento de todos os parâmetros por meio de gráficos atualizados em tempo real. Ao final de cada ensaio, o programa apresenta uma tabela com os valores do coeficiente de dilatação da amostra em faixas de temperatura de interesse.

## 2.0 DESCRIÇÃO DO ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE DILATAÇÃO TÉRMICA E SUAS VARIAÇÕES (A TRAÇÃO CONSTANTE E A VÃO CONSTANTE)

O desenvolvimento da metodologia do ensaio de determinação do coeficiente de dilatação térmica (DCDT) foi iniciado no ano de 1998, período em que outros ensaios na área de cabos estavam sendo desenvolvidos pelo LACTEC. Estes ensaios eram implementados e avaliados paralelamente ao desenvolvimento da primeira bancada de testes em cabos condutores.

Atualmente, o laboratório de ensaios mecânicos do LACTEC possui três bancadas de testes capacitadas para realizar os ensaios de DCDT com configurações que atendem às duas metodologias. A seguir, essas bancadas são apresentadas.

### 2.1 Configurações comuns às três bancadas de ensaios

As bancadas de ensaios em cabos condutores são compostas pelas seguintes partes: sistema de tração, sistema de aquecimento por corrente elétrica, sistema de condicionamento de temperatura ambiente e sistema de medição de deslocamento, força e temperatura.

Os aspectos comuns a cada uma delas são:

- Um computador efetua o controle por meio de algoritmos de controle digital;
- Uma placa ligada ao barramento PCI do computador faz aquisição em 18 bits e envio de sinais externos em 16 bits;
- Condicionador de sinais com placas de recepção de sinais de termopares;
- 16 canais de leitura de tensão/corrente;
- 4 canais de envio de tensão  $\pm 10V$  ou corrente, de 4 a 20 mA;
- A climatização é feita pelo mesmo sistema, garantindo baixa variação de temperatura ambiente;
- Para o aquecimento do condutor, utiliza-se um transformador de corrente com capacidade de até 3 kA.

Para o controle da corrente e, por consequência, da temperatura de aquecimento, a malha de controle é fechada por meio de termopares.

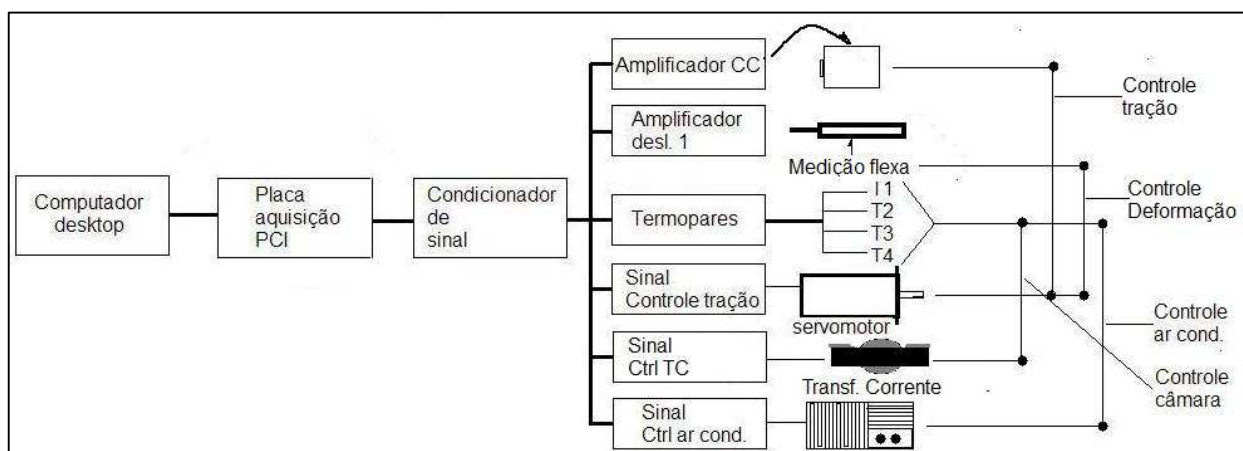


Figura 1. Esquema básico dos sistemas que compõem as bancadas.

Para o sistema de controle de temperatura, são utilizados até trinta e dois canais de leitura de temperatura. O controle de tensão, usando o variador de tensão, é realizado remotamente via RS 485, que, por sua vez, alimenta o transformador de corrente (TC). Esse sistema é utilizado para os aquecimentos da amostra por corrente alternada, com a malha de controle fechada com os sensores de temperatura. O referido sistema tanto realiza o aquecimento em rampa, com taxa de aquecimento pré-definida, como mantém a temperatura constante.

## 2.2 Configuração da bancada 1

Esta bancada foi a primeira das três existentes, com início dos projetos em 1990. Ela ocupa uma área de 80 m<sup>2</sup> e possui um comprimento total de 21 m. Possui capacidade de tração de até 20 tnf.

Diferentemente das outras duas bancadas, esta possui, além do sistema de aquecimento por corrente elétrica, também um sistema de aquecimento por resistências blindadas. O vão útil em que o cabo fica alojado tem 12 m de comprimento. As paredes são constituídas de lã de vidro cobertas por alumínio para facilitar a homogeneização da temperatura. Para efetuar o condicionamento da amostra no interior da bancada e a proteção contra rompimento, são utilizadas doze tampas com isolamento térmico, cada uma com 1 m de comprimento. Para o sistema de controle de temperatura, são utilizados sete canais de leitura de temperatura e envio de tensão para quatro controladores de potência, sendo três monofásicos e um trifásico. A potência total demandada é de 10 kW, distribuídas em 14 resistências (10 resistências de 600 W e quatro resistências de 1 000 W).

Esta bancada realiza somente ensaios em tração constante, devido à falta de vão livre para a catenária do condutor. A Figura 2 mostra maiores detalhes desta bancada.



Figura 2. Bancada 1 de ensaios em cabos – sistema de aquecimento de cabos condutores por corrente em vão confinado.

## 2.3 Configuração da bancada 2

Esta bancada foi a segunda a ser construída dentre as três existentes, com início dos projetos em 2000. Ela ocupa uma área coberta de 160 m<sup>2</sup> e um vão flexível para ensaios que varia de 15 a 55 m, sendo 20 m de vão não coberto. Além do ensaio de DCDT, realiza ensaios de vibração em cabos condutores destinados a linhas de distribuição e transmissão de energia elétrica. É a maior das três bancadas e também a que possui distância cabo-solo mais alto, com até 1,5 m de altura, o que permite realizar o ensaio de DCDT pelas duas metodologias. Possui capacidade de tração de até 30 tnf. A seguir a Figura 3 mostra a bancada descrita.



Figura 3. Bancada 2 de ensaios em cabos – vão coberto de até 35 m e altura de 1,5 m.

#### 2.4 Configuração da bancada 3

Esta bancada foi a terceira a ser construída, com início dos projetos em 2003. Ela ocupa uma área coberta de 90 m<sup>2</sup> tem um vão para ensaios de até 13 m. Além do ensaio de DCDT, realiza vários ensaios mecânicos normalizados, tanto em cabos destinados a linhas de distribuição e transmissão de energia, como em isoladores de vidro e poliméricos. Possui altura cabo-solo de 0,9 m, o que permite realizar o ensaio de DCDT por ambas as metodologias. Possui também capacidade de tração de até 30 tnf. A Figura 4 mostra esta bancada, que foi a utilizada nos ensaios com a nova metodologia.



Figura 4 – Bancada 3 mostrando o vão de até 13 m e 0,9 m de altura – bancada utiliza nos ensaios.

Embora o vão da bancada 2 permita maiores catenárias, por questões de disponibilidade, os ensaios foram realizados na bancada 3. Em trabalhos futuros, serão apresentados resultados de ensaios realizados com o vão maior da bancada 2.

Esta bancada de ensaio em cabos condutores é composta pelas seguintes partes: sistema de tração, sistema de aquecimento por corrente elétrica com malha fechada em temperatura, sistema de condicionamento de temperatura ambiente, sistema de medição de deslocamento vertical, força e temperatura. O vão útil em que o cabo fica alojado é também de 12 m, similar ao da bancada 1, porém não é isolado e fechado como este, e sim aberto e com ambiente controlado.

### 3.0 DESCRIÇÃO DO PROCEDIMENTO DE ENSAIO SEGUNDA A NOVA METODOLOGIA

A execução dessa nova metodologia, difere da metodologia anterior (à tração constante) basicamente pelo não controle de carga, mantendo-se o vão constante. Com isso, a catenária vai progressivamente aumentando, e sua medição é de fundamental importância, pois essa flexa medida é usada no cálculo da variação do comprimento da amostra e consequente determinação do coeficiente de dilatação térmica.

#### 3.1 Descrição da amostra do cabo condutor

O cabo ensaiado é o condutor de alumínio com alma de aço (CAA) 4/0 AWG – Penguin. Este cabo é composto por uma coroa de uma camada de seis fios de alumínio e uma alma com um fio de aço, sendo que seu coeficiente de dilatação térmica é de  $19,1 \mu\epsilon/\text{°C}$  (1). A densidade linear do condutor é de  $0,4332 \text{ kg/m}$  e sua resistência mecânica calculada (RMC), de  $36,44 \text{ kN}$  (1).

#### 3.2 Execução do ensaio

Figura 4. Bancada 3 mostrando o vão de até 13 m e 0,9 m de altura – bancada utilizada nos ensaios.

A tração inicial e a temperatura do condutor são adotadas como as utilizadas no projeto da linha de transmissão. Para esse comparativo, a tração inicial é de 20% da RMC e a faixa de temperatura é de 25 a 75 °C. No começo do ensaio, assim que a carga é estabilizada, o sistema de controle trava a parte fixa do sistema de tração. Na sequência, ocorre a injeção gradativa de corrente, pois correntes elevadas geram gradientes de temperatura indesejados, prejudicando a homogeneização da temperatura da amostra. Com o sistema de tração desligado, o valor da carga vai aos poucos diminuindo à medida que a catenária aumenta pela expansão térmica da amostra. As leituras da catenária (flexa), tração e temperatura do condutor são adquiridas simultaneamente.

Em resumo, o programa realiza de forma automatizada as etapas descritas a seguir:

- Após o tempo de acomodação na tração de ensaio, o programa solicita a informação de temperatura do ensaio. O condutor é então tracionado suavemente e sem trancos até a carga de ensaio;
- No instante em que a carga é atingida, o sistema grava a temperatura inicial do cabo e inicia-se a aquisição dos dados do transdutor de deslocamento, situado no meio do vão (medidas em  $\mu\text{m}$ );
- A taxa de aquisição é de 120 amostras por minuto para cada grandeza medida (tempo, tração, catenária e temperatura);
- A rampa de subida de temperatura tem a duração de 50 a 60 minutos, tempo este definido pelo incremento de temperatura que é gradativo e uniforme através da corrente fornecida pelo TC; e
- Quando a temperatura de ensaio alcança a estipulada, o sistema é desligado e encerra-se com isso a aquisição de dados dos sensores.

### 4.0 RESULTADOS

Após o término dos ensaios, o programa fornece gráficos e tabelas que resumem o comportamento do ensaio. O primeiro gráfico apresentado é o do alongamento devido à expansão térmica (em  $\mu\text{m}$ ) *versus* temperatura (em °C), que serve como subsídio para o cálculo do coeficiente de dilatação térmica do condutor com base nas equações da catenária (2) (6). O gráfico apresentado na Figura 5 é composto por três curvas: a curva preta é a referência do coeficiente de dilatação térmica teórico, a azul é a do ensaio a tração constante e a vermelha, do ensaio a vão constante.

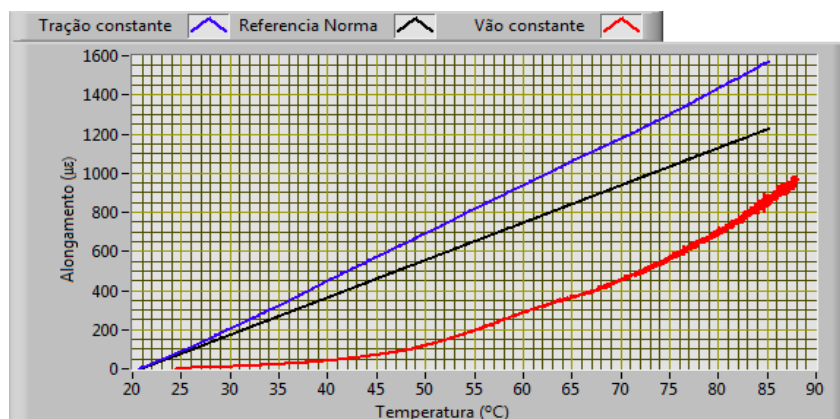


Figura 5. Curvas da expansão térmica levantada pelos ensaios à tração constante e a vão constante.



[illegible]

Os dados da Tabela 2 mostram que as diferenças em relação ao coeficiente de norma (1), de  $19,1 \mu\text{m}/^\circ\text{C}$ , são maiores no início, decrescendo à medida que sobe a temperatura. Ao final, os coeficientes levantados atingem valores um pouco acima do valor teórico da norma.

## 5.0 CONCLUSÕES

Os resultados mostram que os coeficientes de expansão térmica possuem valores maiores na metodologia com tração constante. A nova metodologia, com tração não controlada, aproxima-se mais da realidade operacional da linha, especificamente nos vãos de um mesmo tramo. O que se esperava, a princípio, era que houvesse uma proximidade maior entre os valores, o que ocorreu somente na parte final dos ensaios. Isso leva os pesquisadores, não somente do LACTEC como de demais instituições e fabricantes, a continuar esse trabalho de pesquisa, visando chegar a conclusões sobre essas variações e consolidar ou não esta nova metodologia, tendo em vista que não há normas nacionais e internacionais sobre este tema.

Essas diferenças ocorrem em parte devido ao comportamento do módulo de elasticidade da amostra. Quanto maior a temperatura do condutor, menor o valor do módulo do cabo, causando maior alongamento, que é somado à dilatação (4). Esse comportamento tem relação direta com a construção do condutor, que não se comporta como uma barra cilíndrica maciça por ser constituído por camadas de fios de alumínio e aço de seção circular. Fica assim claro o motivo para o método de ensaio a tração constante resultar em maiores valores de deformação.

Quando ocorre a dilatação térmica do condutor, os fios da camada de alumínio se alongam mais do que a alma de aço, ocorrendo então um alívio da tensão nesta camada. Como a tração na amostra é constante, isto faz com que a alma fique mais tensionada, ocorrendo então um acréscimo de deformação elástica, além da dilatação térmica. Esse efeito vai se pronunciando cada vez mais com o aumento da temperatura até que a alma de aço suporte praticamente toda a tração (3). A Figura 7 esboça alguns alongamentos envolvidos no processo (2). O alongamento por fluência não está incluído por, neste caso, não influenciar significativamente os resultados.

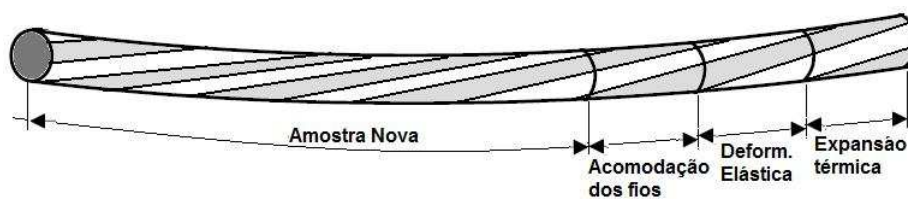


Figura 7. Alongamentos que são significativos no resultado de dilatação térmica.

Um comparativo entre as Tabelas 1 e 2 deixa claro que o alongamento do condutor obtido pelas diferentes metodologias possui comportamentos bem distintos, por se tratar de solicitações diferentes nas amostras.

A continuação deste trabalho prevê utilizar-se o vão de 30 m da bancada 2, descrita anteriormente, em que serão utilizados novos cabos, os quais serão ou estão sendo introduzidos no mercado brasileiro. As tecnologias empregadas nesses condutores vão desde cabos com alma em fibra de carbono até ligas diferentes, permitindo valores de flechas reduzidas quando solicitados no limite de operação. Um novo sistema com maior capacidade de aquisição e controle será utilizado nestes ensaios, e poderão propiciar o levantamento de novos dados de forma mais precisa.

## 6.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Condutor de alumínio nu com alma de aço zincado para linhas aéreas – Especificação - NBR 7270:2009. Brasil.
- (2) Task force B2.12.3. Sag-tension calculation - Methods for overhead lines, CIGRÉ.
- (3) CAVALCANTI, Evandro Sérgio Camêlo; TORRES, Marcio Sanglard; - Medição do coeficiente de dilatação térmica de condutores de alumínio com alma de aço, II SEMEL, Curitiba 1990.
- (4) MANNALA, Marcos José; SOUZA JR, Oswaldo Honorato; HOFFMANN, João Nelson; – Investigação dos parâmetros mecânicos de cabos CAA em temperaturas elevadas, XVII SNPTEE, Curitiba-PR, 16 a 21 de Outubro de 2005.
- (5) MANNALA, Marcos J., SOUZA JR, Oswaldo H., - Metodologia de Ensaio para determinação do coeficiente de dilatação térmica de cabos condutores para linhas de transmissão, XX SNPTEE, Recife-PE, 22 a 25 de Novembro de 2009.

(6) LABEGALINI, Paulo Roberto e José Ayrtton, FUCKS, Rubens Dario, ALMEIDA, Márcio Tadeu - Projetos Mecânicos das Linhas Aéreas de Transmissão, Editora Edgard Blucher, Ltda., 2ª. Edição, 1992

## 7.0 DADOS BIOGRÁFICOS



**Marcos José Mannala** nasceu em Curitiba, PR, em 23 de agosto de 1967. Recebeu os títulos de técnico em eletrotécnica pelo CEFET, em 1988, graduado em Engenharia Elétrica pela UFPR, em março de 2001, e Mestre em Engenharia de Produção e Sistemas com ênfase em sistemas de controle pela PUC-PR, em outubro de 2004. Trabalhou na Companhia Paranaense de Energia – COPEL – como fiscal de obras de LT's e na área de estudo de projetos de LT's. Atualmente, trabalha em pesquisa e ensaios na área de distribuição e transmissão de energia, no Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC).

**Carlos Eduardo Lourenço Mattos** nasceu em São Paulo, SP, em 10 de maio de 1967. Graduiu-se em Engenharia Metalúrgica na Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) em Ouro Preto, MG, em 1991. Especialista em Engenharia da Qualidade pela American Society for Quality, em 1996, pós-graduado em Comércio Exterior pela Universidade Mackenzie, em 1998, e Gestão de Negócios pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica, em 2003, e Mestrando em Mecânica pela UTFPR (Universidade Tecnológica Federal do Paraná). Trabalhou na Samarco Mineração AS, Nacional de Grafite LTDA, Hitachi Ar Condicionado Brasil S/A, Orica do Brasil e IBQ, atuando nas áreas de Engenharia de Processos, Qualidade, Comércio Exterior e Logística. Atualmente, trabalha em pesquisa e ensaios na área de distribuição e transmissão de energia no Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC).

**Gabriel Ruggiero do Amaral** nasceu no Rio de Janeiro, RJ, em 10 de abril de 1989. É graduado em Engenharia Mecânica, pela Universidade Federal do Paraná (UFPR). Atualmente, trabalha em pesquisa e ensaios na área de distribuição e transmissão de energia no Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC).

**Oswaldo Honorato de Souza Junior** nasceu em Heliódora, MG, em 10 de julho de 1957. Graduiu-se em Engenharia Mecânica na Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), em Itajubá MG, em 1978. Recebeu os títulos de Mestre em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Itajubá, em 1994, e Doutor em Engenharia Mecânica pela PUC-PR, em 2010. Trabalhou na companhia Centrais Elétricas do Norte do Brasil S/A (ELETRONORTE), no setor de Engenharia de Manutenção, e na Companhia Paranaense de Energia (COPEL), como Pesquisador de P&D desde 1993. Desde 1995, também atua como professor do Departamento de Mecânica da UTFPR (Universidade Tecnológica Federal do Paraná).