

Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP
Departamento de Engenharia Mecatrônica e de
Sistemas Mecânicos

ISSN 1517-3526
BT/PMR/0703

**Aplicação do Método da
Expansão em Funções
Hierárquicas na Solução das
Equações de Návier-Stokes
em Duas Dimensões para
Fluídos Compressíveis em
Alta Velocidade.**

Thadeu das Neves Conti
Eduardo Lobo Lustosa Cabral

Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP
Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos

Diretor: Prof. Dr. Vahan Agopyan

Vice-Diretor: Prof. Dr. Ivan Gilberto Sandoval Falleiros

Chefe do Departamento: Prof. Dr. Lucas Antonio Moscato

Suplente do Chefe do Departamento: Prof. Dr. Paulo Eigi Miyagi

Conselho Editorial:

Prof. Dr. Lucas Antonio Moscato

Prof. Dr. Edison Gonçalves

Prof. Dr. Celso Massatoshi Furukawa

Prof. Dr. Nicola Getschko

Prof. Dr. Gilberto Francisco Martha de Souza

Prof. Dr. Marcelo Godoy de Simões

Prof. Dr. Marcos de Sales Guerra Tsuzuki

Coordenador Técnico:

Prof. Dr. Lucas Antonio Moscato

Esta é uma publicação da Escola Politécnica da USP/ Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos, fruto de pesquisas realizadas por docentes e pesquisadores desta Universidade

Iniciou-se a partir de outubro de 1999 a publicação do boletim técnico do Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos, criado a partir do desdobramento do antigo Departamento de Engenharia Mecânica.

O presente trabalho é resumo da tese de doutorado apresentada por Thadeu das Neves Conti, sob orientação do Prof. Dr. Eduardo Lobo Lustosa Cabral: “Aplicação do Método da Expansão em Funções Hierárquicas na Solução das Equações de Navier-Stokes em Duas Dimensões para Fluidos Compressíveis em Alta Velocidade”, defendida em 08/06/06, na EPUSP.

A íntegra da tese encontra-se à disposição com o autor e na Biblioteca de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica/USP.

FICHA CATALOGRÁFICA

Conti, Thadeu das Neves

Aplicação do método da expansão em funções hierárquicas na solução das equações de Navier-Stokes em duas dimensões para fluidos compressíveis em alta velocidade / Thadeu das Neves Conti, Eduardo Lobo Lustosa Cabral. -- São Paulo : EPUSP, 2007.

p. -- (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos ; BT/PMR/0703)

1. Mecânica dos fluidos computacional 2. escoamento monofásico 3. Método dos elementos finitos 4. Equações de Navier-Stokes. I. Cabral, Eduardo Lobo Lustosa II. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos III. Título IV. Série
ISSN 1517-3526

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECATRÔNICA
E DE SISTEMAS MECÂNICOS**

**APLICAÇÃO DO MÉTODO DA EXPANSÃO EM FUNÇÕES
HIERÁRQUICAS NA SOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES DE NAVIER-
STOKES EM DUAS DIMENSÕES PARA FLUIDOS COMPRESSÍVEIS
EM ALTA VELOCIDADE**

Palavras Chaves: Mecânica dos Fluidos Computacional; Escoamento Compressível;
Método dos Elementos Finitos; Equações de Navier-Stokes e Ondas de Choque.

Thadeu das Neves Conti

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Lobo Lustosa Cabral

**São Paulo
2006**

RESUMO

O trabalho desenvolvido nesta tese propõe a aplicação do método da expansão em funções hierárquicas elaborado por **Zienkiewics e Morgan (1983)**, para a solução das equações de conservação da massa (continuidade), conservação da quantidade de movimento (Navier-Stokes) e conservação da energia, para fluidos compressíveis em duas dimensões e em alta velocidade. Esse método consiste no emprego do método de elementos finitos utilizando a formulação Petrov-Galerkin, conhecido como SUPG (*“Streamline Upwind Petrov-Galerkin”*), desenvolvido por **Brooks e Hughes (1982)**, aplicado em conjunto com uma expansão das variáveis em funções hierárquicas. A fim de testar e validar o método numérico proposto, assim como o programa computacional elaborado, foram simulados alguns casos conhecidos da literatura. Os casos estudados foram os seguintes: teste de Continuidade; teste de convergência e estabilidade; problema do degrau de temperatura e problema do choque oblíquo, onde o objetivo desse último caso era, basicamente, verificar a captura da onda de choque pelo método numérico desenvolvido. Através dos casos estudados e em função dos resultados obtidos nas simulações realizadas, conclui-se que o objetivo desse trabalho foi alcançado de maneira satisfatória, pois os resultados obtidos com o método desenvolvido nesse trabalho foram qualitativamente e quantitativamente bons, quando comparados com os resultados teóricos.

ABSTRACT

The Thesis develops a new application for the Hierarchical Function Expansion Method, proposed by Zienkiewics and Morgan (1983), for the solution of the Navier-Stokes equations for compressible fluids in two dimensions and in high velocity. This method is based on the finite elements method using the Petrov-Galerkin formulation, know as, SUPG (Streamline Upwind Petrov-Galerkin) developed by Brooks and Hughes (1982), and applied in conjunction with the expansion of the variables into hierarchical functions. To test and validate the numerical method proposed as well as the computational program developed some cases whose theoretical solution are known simulated. These cases are the following: continuity test; stability and convergence test; temperature step problem; and several oblique shocks. The objective of the last cases is basically to verify the capture of the shock wave by the method developed. The results obtained in the simulations of the cases performed with the proposed method were good both qualitatively and quantitatively when compared with the teorethical solutions. This allows us to conclude that the objective of this Thesis was satisfactorily reached.

INTRODUÇÃO

A solução de problemas complexos das áreas de mecânica dos fluidos e transferência de calor através do uso de técnicas numéricas, conhecida como “Computational Fluid Dynamics (CFD)”, é, hoje, uma realidade, graças ao desenvolvimento de computadores de alta velocidade de processamento e de grande capacidade de armazenamento de dados. Em função desse avanço computacional, o desenvolvimento de algoritmos para a solução de problemas, referentes às mais diversas áreas, tem-se tornado um fato e recebido muita atenção pelos analistas numéricos, **Maliska (1995)**. Como exemplo, pode ser citado a solução de um escoamento turbulento sobre um aerofólio, que usando computadores de grande porte na década de 60 consumiria anos de processamento a um custo de milhões de dólares. A solução do mesmo problema, nos dias de hoje, utilizando computadores atuais, consumiria apenas alguns minutos de CPU a um custo de centenas de dólares.

O trabalho, aqui desenvolvido, propõe a aplicação do método da expansão em funções hierárquicas, elaborado por **Zienkiewics e Morgan (1983)**, para a solução das equações de Navier-Stokes para fluidos compressíveis em duas dimensões em alta velocidade. Esse método consiste no emprego do método de elementos finitos utilizando a formulação Petrov-Galerkin em conjunto com uma expansão das variáveis em funções hierárquicas. A utilização de funções de expansão hierárquicas permite alterar o grau do polinômio de ajuste das variáveis, como ocorre no método de elementos finitos convencional. Além disso, o método numérico proposto tem a grande vantagem de poder adaptar o grau do polinômio até o valor necessário ou desejado, ao invés de usar malhas extremamente refinadas.

De um modo geral o método clássico dos resíduos ponderados (Galerkin) é utilizado para obter as equações e os coeficientes das funções de expansão. No entanto, observa-se que em problemas de transporte convectivo-difusivo, com convecção predominante, o método de Galerkin é falho. Assim, normalmente, é utilizada a formulação

Petrov-Galerkin, onde as funções peso são diferentes das funções de expansão, o que difere da adotada na formulação Galerkin.

A formulação Petrov-Galerkin consiste no método conhecido como SUPG (*“Streamline Upwind Petrov-Galerkin”*), desenvolvido por **Brooks e Hughes (1982)**. Nesse método as funções peso são construídas adicionando-se às funções peso da formulação de Galerkin uma perturbação que atua somente na direção do escoamento. Segundo **Zienkiewicz et al. (1976)**, este método apresenta estabilidade e precisão nos resultados.

O método da expansão em funções hierárquicas foi elaborado por **Zienkiewicz e Morgan (1983)**, sendo que a sua grande vantagem está em poder alterar o grau da expansão sem a necessidade de reiniciar o problema. As funções de expansão são formadas por polinômios de Legendre, os quais são ajustados nos elementos retangulares, de forma a definir funções de canto, de lado e de área. A razão principal de serem utilizados, neste trabalho, os polinômios de Legendre como base das funções de expansão, ao invés de funções ortogonais do tipo seno, cosseno ou exponencial, é porque um número menor de funções é exigido quando se usa polinômios. Isso ocorre, pois um polinômio é mais complexo do que as outras funções e, comparativamente, tem uma maior capacidade de ajuste. Observa-se que, quanto menor for o número de funções utilizadas (necessárias), mais simples se torna o método numérico.

Objetivo do Trabalho

O objetivo deste trabalho é desenvolver um método numérico, baseado no método dos elementos finitos, que utiliza a formulação Petrov-Galerkin (*“Streamline Upwind Petrov-Galerkin”* - SUPG) para a solução das equações de Navier-Stokes em duas dimensões, para fluidos compressíveis em alta velocidade. Nesse método, como proposto por **Zienkiewicz e Morgan (1983)**, a expansão das variáveis é realizada por funções hierárquicas.

DESENVOLVIMENTO TEÓRICO

O método numérico proposto, neste trabalho, consiste em uma aplicação do método da expansão em funções hierárquicas, para a solução de problemas de escoamento em duas dimensões, de fluidos compressíveis em alta velocidade. No desenvolvimento deste trabalho são utilizadas as equações da continuidade, de conservação da quantidade de movimento, da velocidade mássica, de estado, de conservação da energia e da temperatura, todas em duas dimensões, direções x e z e cujas equações são mostradas resumidamente a seguir.

Equação da continuidade:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0 \quad . \quad (1)$$

Equações de conservação da quantidade de movimento:

$$\frac{\partial G_x}{\partial t} + \frac{\partial G_x u}{\partial x} + \frac{\partial G_x w}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{4}{3}\mu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} ; e \quad (2)$$

$$\frac{\partial G_z}{\partial t} + \frac{\partial G_z u}{\partial x} + \frac{\partial G_z w}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{4}{3}\mu \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} . \quad (3)$$

Equações das velocidades mássicas:

$$G_x = \rho u ; e \quad (4)$$

$$G_z = \rho w . \quad (5)$$

Equação de estado:

$$p - \rho RT = 0 . \quad (6)$$

Equação de conservação da energia:

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial E u}{\partial x} + \frac{\partial E w}{\partial z} = k \nabla^2 T - p \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 +$$

$$+ 2\mu \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial z} \right] - \frac{2\mu}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} \right). \quad (7)$$

Equação da temperatura:

$$E = \rho c_v T. \quad (8)$$

Para facilitar a solução das equações de conservação e, posteriormente, permitir o uso de geometrias irregulares, sem grandes modificações nas equações, é utilizado um outro sistema de coordenadas. Nesse novo sistema, as coordenadas são as variáveis ξ e η , cuja correspondência com as coordenadas do sistema cartesiano x e z , de cada elemento, é dada por:

$$\xi = 2 \frac{(x - x_{ij})}{\Delta x_{ij}}; \text{ e} \quad (9)$$

$$\eta = 2 \frac{(z - z_{ij})}{\Delta z_{ij}}. \quad (10)$$

Observa-se que tanto ξ como η variam de -1 a 1 em cada elemento i,j . Nota-se que as coordenadas ξ e η são coordenadas locais de cada elemento e que as suas derivadas, em função das coordenadas cartesianas x e z , são obtidas, respectivamente, pela derivação das equações (9) e (10), obtendo-se o seguinte:

$$\frac{\partial \xi}{\partial x} = \frac{2}{\Delta x_{ij}}; \text{ e} \quad (11)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial z} = \frac{2}{\Delta z_{i,j}}. \quad (12)$$

As variáveis ρ , u , w , G_x , G_z , E e T são descritas por uma série de funções dentro de cada um dos elementos i,j do domínio de discretização, como se segue:

$$\begin{aligned}
\rho &= \sum_{m=1}^M \rho_m N_m ; & u &= \sum_{m=1}^M u_m N_m ; & w &= \sum_{m=1}^M w_m N_m ; & G_x &= \sum_{m=1}^M G_{x_m} N_m ; \\
G_z &= \sum_{m=1}^M G_{z_m} N_m ; & p &= \sum_{m=1}^M p_m N_m ; & E &= \sum_{m=1}^M E_m N_m ; & e & T = \sum_{m=1}^M T_m N_m .
\end{aligned} \tag{13}$$

onde M é o número total de funções utilizadas na expansão em série das variáveis, N_m é a m -ésima função de expansão para o elemento i,j e $\rho_m^{i,j}, u_m^{i,j}, w_m^{i,j}, G_{x_m}^{i,j}, G_{z_m}^{i,j}, E_m^{i,j}, p_m^{i,j}$ e $T_m^{i,j}$ são, respectivamente, os coeficientes das variáveis $\rho, u, w, G_x, G_z, E, p$ e T , correspondentes à m -ésima função de expansão para o elemento i,j da malha. Ressalta-se que, dependendo do grau da expansão ou do número de funções de expansão utilizadas nas séries, pode-se ajustar a precisão desejada para a solução.

A função peso P_m segue a formulação de Petrov-Galerkin sendo dada, segundo **Hughes e Brooks (1982)**, por:

$$P_m^{i,j} = N_m + \frac{\Delta t}{2} \bar{u}_{i,j} \frac{\partial N_m}{\partial x} + \frac{\Delta t}{2} \bar{w}_{i,j} \frac{\partial N_m}{\partial z} , \tag{14}$$

Inicialmente, integra-se e pesa-se o conjunto de equações de conservação e de estado, equações (1) à (8), em cada elemento do domínio computacional. A função peso utilizada em todos os termos do conjunto de equações acima mencionado segue a formulação Petrov-Galerkin, conhecida como formulação Petrov-Galerkin consistente. A partir, dessa manipulação matemática, da aproximação da derivada temporal do conjunto de equações por uma diferença para trás e ainda da aplicação do teorema de Green nas equações de conservação da quantidade de movimento, obtém-se, então, um conjunto de equações, onde cada equação pode ser colocada na forma matricial cuja solução apresenta o campo de velocidades, pressão e temperatura do fluido, dado pelas equações (15) à (22) descritas abaixo:

Equação da continuidade

$$\begin{aligned} & \sum_{n=1}^M \rho_n^{i,j} \left\{ \frac{\Delta x_{i,j} \Delta z_{i,j}}{4\Delta t} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 P_m N_n d\xi d\eta + \frac{\Delta z_{i,j}}{2} \sum_{k=1}^M u_k^{i,j} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 P_m \frac{\partial N_n N_k}{\partial \xi} d\xi d\eta + \right. \\ & \left. + \frac{\Delta x_{i,j}}{2} \sum_{k=1}^M w_k^{i,j} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 P_m \frac{\partial N_n N_k}{\partial \eta} d\xi d\eta \right\} = \frac{\Delta x_{i,j} \Delta z_{i,j}}{4\Delta t} \sum_{n=1}^M \rho_n^{t-\Delta t} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 P_m N_n d\xi d\eta ; \end{aligned}$$

para $m=1, \dots, M$, (15)

Equação de conservação da quantidade de movimento na direção x

$$\begin{aligned} & \sum_{n=1}^M G_x \left\{ \frac{\Delta x_{ij} \Delta z_{ij}}{4\Delta t} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 P_m N_n d\xi d\eta + \frac{\Delta z_{ij}}{2} \sum_{k=1}^M u_k \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 P_m \frac{\partial N_n N_k}{\partial \xi} d\xi d\eta + \right. \\ & \left. + \frac{\Delta x_{i,j}}{2} \sum_{k=1}^M w_k \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 P_m \frac{\partial N_n N_k}{\partial \eta} d\xi d\eta \right\} = \frac{\Delta x_{i,j} \Delta z_{i,j}}{4\Delta T} \sum_{n=1}^M G_{x_n}^{t-\Delta t} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \rho_m N_n d\xi d\eta - \\ & - \frac{\Delta z_{i,j}}{2} \sum_{n=1}^M p_n \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 P_m \frac{\partial N_n}{\partial \xi} d\xi d\eta + \sum_{n=1}^M u_n \left\{ \frac{4}{3} \mu \frac{\Delta z_{i,j}}{\Delta x_{i,j}} \left[\int_{-1}^1 \left(P_m \frac{\partial N_n}{\partial \xi} \right)_{\xi=-1}^{\xi=1} d\eta - \right. \right. \\ & \left. \left. - \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \frac{\partial P_m}{\partial \xi} \frac{\partial N_n}{\partial \xi} d\xi d\eta \right] + \mu \frac{\Delta x_{i,j}}{\Delta z_{i,j}} \left[\int_{-1}^1 \left(P_m \frac{\partial N_n}{\partial \eta} \right)_{\eta=-1}^{\eta=1} d\xi - \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \frac{\partial P_m}{\partial \eta} \frac{\partial N_n}{\partial \eta} d\xi d\eta \right] \right\}, \end{aligned}$$

para $m=1, \dots, M$, (16)

Equação de conservação da quantidade de movimento na direção z

$$\begin{aligned} & \sum_{n=1}^M G_{z_n} \left\{ \frac{\Delta x_{ij} \Delta z_{ij}}{4\Delta t} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 P_m N_n d\xi d\eta + \frac{\Delta z_{ij}}{2} \sum_{k=1}^M u_k \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 P_m \frac{\partial N_n N_k}{\partial \xi} d\xi d\eta + \right. \\ & \left. + \frac{\Delta x_{i,j}}{2} \sum_{k=1}^M w_k \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 P_m \frac{\partial N_n N_k}{\partial \eta} d\xi d\eta \right\} = \frac{\Delta x_{i,j} \Delta z_{i,j}}{4\Delta T} \sum_{n=1}^M G_{z_n}^{t-\Delta t} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \rho_m N_n d\xi d\eta - \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -\frac{\Delta x_{i,j}}{2} \sum_{n=1}^M p_n \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 P_m \frac{\partial N_n}{\partial \eta} d\xi d\eta + \sum_{n=1}^M w_n \left\{ \frac{4}{3} \mu \frac{\Delta x_{i,j}}{\Delta z_{i,j}} \left[\int_{-1}^1 \left(P_m \frac{\partial N_n}{\partial \eta} \right)_{\eta=-1}^{\eta=1} d\xi - \right. \right. \\
& \left. \left. - \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \frac{\partial P_m}{\partial \eta} \frac{\partial N_n}{\partial \eta} d\xi d\eta \right] + \mu \frac{\Delta z_{i,j}}{\Delta x_{i,j}} \left[\int_{-1}^1 \left(P_m \frac{\partial N_n}{\partial \xi} \right)_{\xi=-1}^{\xi=1} d\eta - \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \frac{\partial P_m}{\partial \xi} \frac{\partial N_n}{\partial \xi} d\xi d\eta \right] \right\}, \\
& \text{para } m = 1, \dots, M. \tag{17}
\end{aligned}$$

Equação da velocidade mássica na direção x

$$\sum_{n=1}^M u_n \sum_{k=1}^M \rho_k \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 P_m N_n N_k d\xi d\eta = \sum_{n=1}^M G_{x_n} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 P_m N_n d\xi d\eta ; \text{ para } m = 1, \dots, M . \tag{18}$$

Equação da velocidade mássica na direção z

$$\sum_{n=1}^M w_n \sum_{k=1}^M \rho_k \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 P_m N_n N_k d\xi d\eta = \sum_{n=1}^M G_{z_n} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 P_m N_n d\xi d\eta ; \text{ para } m = 1, \dots, M . \tag{19}$$

Equação de estado

$$\sum_{n=1}^M p_n \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 P_m N_n d\xi d\eta - R \sum_{n=1}^M \rho_n \sum_{k=1}^M T_k \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 P_m N_n N_k d\xi d\eta = 0 ;$$

$$\text{para } m = 1, \dots, M. \tag{20}$$

Equação de conservação da energia

$$\begin{aligned}
& \sum_{n=1}^M E_n \left\{ \frac{\Delta x_{ij} \Delta z_{ij}}{4\Delta t} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 P_m N_n d\xi d\eta + \sum_{k=1}^M u_k \frac{\Delta z_{ij}}{2} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 P_m \frac{\partial N_n N_k}{\partial \xi} d\xi d\eta + \right. \\
& \left. + \sum_{k=1}^M w_k \frac{\Delta x_{ij}}{2} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 P_m \frac{\partial N_n N_k}{\partial \eta} d\xi d\eta \right\} = \frac{\Delta x_{ij} \Delta z_{ij}}{4\Delta t} \sum_{n=1}^M E_n^{t-\Delta t} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 P_m N_n d\xi d\eta + \\
& + \sum_{n=1}^M T_n \left\{ K \frac{\Delta z_{ij}}{\Delta x_{ij}} \left[\int_{-1}^1 \left(P_m \frac{\partial N_n}{\partial \xi} \right)_{\xi=-1}^{\xi=1} d\eta - \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \frac{\partial N_m}{\partial \xi} \frac{\partial N_n}{\partial \xi} d\xi d\eta \right] + \right. \\
& \left. + K \frac{\Delta x_{ij}}{\Delta z_{ij}} \left[\int_{-1}^1 P_m \left(\frac{\partial N_n}{\partial \eta} \right)_{\eta=-1}^{\eta=1} d\xi - \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \frac{\partial N_m}{\partial \eta} \frac{\partial T}{\partial \eta} d\xi d\eta \right] \right\} + \\
& + \sum_{n=1}^M u_n \sum_{r=1}^K w_k \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 P_m \frac{\partial N_n}{\partial \xi} \frac{\partial N_k}{\partial \eta} d\xi d\eta + \\
& + \frac{\Delta x_{ij}}{\Delta z_{ij}} \sum_{n=1}^M w_n \sum_{k=1}^M w_k \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 P_m + \frac{\partial N_n}{\partial \eta} \frac{\partial N_k}{\partial \eta} d\xi d\eta \left\} - \\
& - \frac{\mu}{3} \left[\Delta z_{ij} \sum_{n=1}^M u_n \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 P_m \frac{\partial N_n}{\partial \xi} d\xi d\eta + \Delta x_{ij} \sum_{n=1}^M w_n \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 P_m \frac{\partial N_n}{\partial \eta} d\xi d\eta \right] + \\
& + 2\mu \left\{ \frac{\Delta z_{i,j}}{\Delta x_{i,j}} \sum_{n=1}^M u_n \sum_{k=1}^M u_k \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 P_m \frac{\partial N_n}{\partial \xi} \frac{\partial N_k}{\partial \xi} d\xi d\eta + \right. \\
& \left. + \sum_{n=1}^M p_n \left\{ \frac{2}{\Delta x} \sum_{k=1}^M u_k \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 P_m N_n \frac{\partial N_k}{\partial \xi} d\xi d\eta + \frac{2}{\Delta z} \sum_{k=1}^M w_k \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 P_m N_n \frac{\partial N_k}{\partial \eta} d\xi d\eta \right\} \right\},
\end{aligned}$$

para $m = 1, \dots, M$.

(21)

Equação da temperatura

$$c_v \sum_{n=1}^M T_n \sum_{k=1}^M \rho_k \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 P_m N_n N_k d\xi d\eta = \sum_{n=1}^M E_n \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 P_m N_n d\xi d\eta ,$$

para $m = 1, \dots, M$. (22)

As funções de expansão hierárquicas utilizadas neste trabalho, para a solução das equações de Navier-Stokes, são baseadas em polinômios de Legendre, ajustados nos elementos retangulares de forma conveniente. A associação das funções de expansão aos elementos é feita de forma a definir funções de canto, de lado e de área. A ordem das funções associadas aos lados e às áreas dos elementos é definida de forma a ter o grau necessário ou desejado. Neste trabalho as funções de expansão estão preparadas para utilizar grau 1 até 6. O método de quadratura de Gauss, é utilizado para o cálculo das integrais envolvidas na solução das equações de conservação. Ressalta-se que, embora o grau das funções de expansão adotadas neste trabalho esteja limitado até 6, nada impede que sejam acrescidos graus maiores, para a solução de problemas que exijam um maior detalhamento.

A Figura 1 apresenta um elemento típico e os parâmetros hierárquicos associados com o seus cantos (1,2,3 e 4), lados (L_x e L_z) e áreas (A_n).

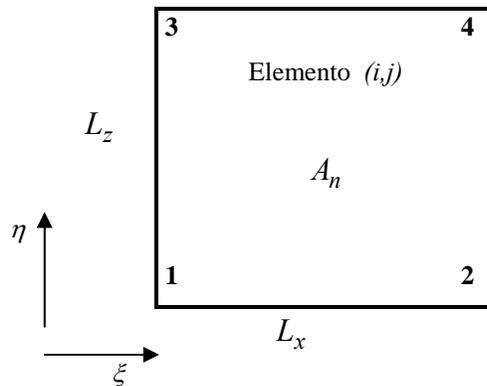


Figura 1 - Elemento retangular de duas dimensões e seus parâmetros associados.

RESULTADOS

Com o objetivo de aplicar e, conseqüentemente, analisar o método numérico proposto neste trabalho, foram simulados alguns casos conhecidos da literatura. Esses casos são os seguintes: teste de consistência e estabilidade, problema do degrau de temperatura e problema do choque oblíquo.

A partir da aplicação do método numérico proposto para a solução das equações de conservação, elaborou-se um programa computacional para simular e poder analisar os testes e problemas de mecânica dos fluidos, acima citados, denominado PMEFH2D e, conseqüentemente, poder validar o método numérico desenvolvido neste trabalho.

O fluido de trabalho utilizado para testar o método numérico desenvolvido foi o ar, considerando a sua viscosidade $\mu = 2.10^{-5}$ kg/ms e a sua condutividade térmica $k = 2.10^{-2}$ J/msK, constantes. Quanto à discretização espacial, o método numérico desenvolvido neste trabalho empregou malhas estruturadas constituídas de elementos retangulares.

O primeiro caso realizado consiste na verificação da consistência e estabilidade do método numérico, através da simulação de uma onda de choque normal de um escoamento supersônico. É importante ressaltar que, nesse teste, não há captura da onda de choque, isto é, a onda de choque reproduzida neste caso é apenas uma reprodução das condições de contorno do problema.

A figura 2 ilustra o domínio computacional, onde a face inferior esquerda contém as condições de contorno que caracterizam a região 1, anterior ao choque, e a face inferior direita contém as condições de contorno que caracterizam a região 2, posterior ao choque. A linha pontilhada representa a linha de choque normal que separa as duas regiões.

As condições de contorno da região 1 (anterior ao choque) fornecidas na face inferior esquerda são: temperatura $T_1 = 300$ k; pressão $p_1 = 1$ bar; velocidade na direção x ,

$u_1 = 694$ m/s (velocidade normal à linha de choque) e velocidade na direção z , $w_1 = 0$ (velocidade tangencial à linha de choque).

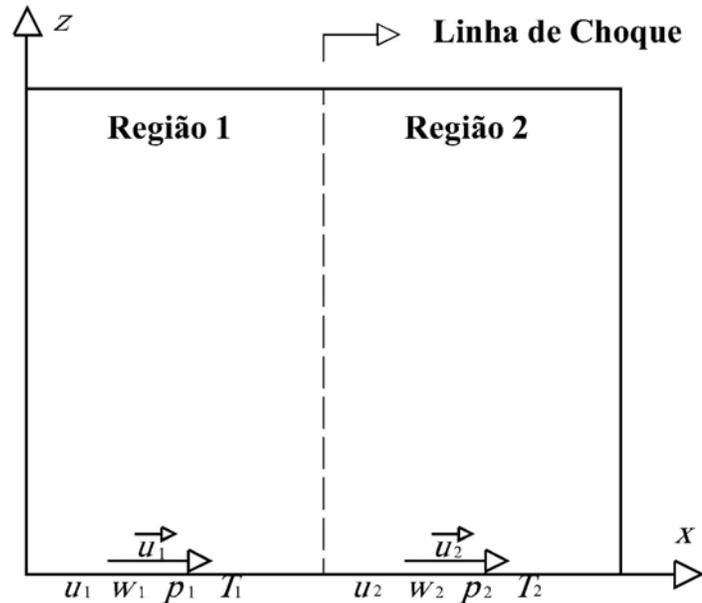


Figura 2 – Domínio computacional (1,2 m x 1,2 m) do teste de convergência e estabilidade.

As condições de contorno da região 2 (posterior ao choque) fornecidas na face inferior direita são: temperatura $T_2 = 506,4$ k; pressão $p_2 = 4,2$ bar; velocidade na direção x , $u_2 = 260,2$ m/s (velocidade normal à linha de choque) e velocidade na direção z , $w_2 = 0$ (velocidade tangencial à linha de choque).

Os valores das condições de contorno de velocidade, pressão e temperatura da região 2 (região posterior ao choque) são obtidas pelas equações de salto, descritas abaixo, segundo **Simões-Moreira (2002)**, para efeito de comparação com os resultados obtidos pelo método numérico desenvolvido neste trabalho.

A seguir é mostrado na figura 3, o comportamento da velocidade normal nas regiões 1, 2 e interface do escoamento supersônico com choque normal, imposto pelas condições de contorno.

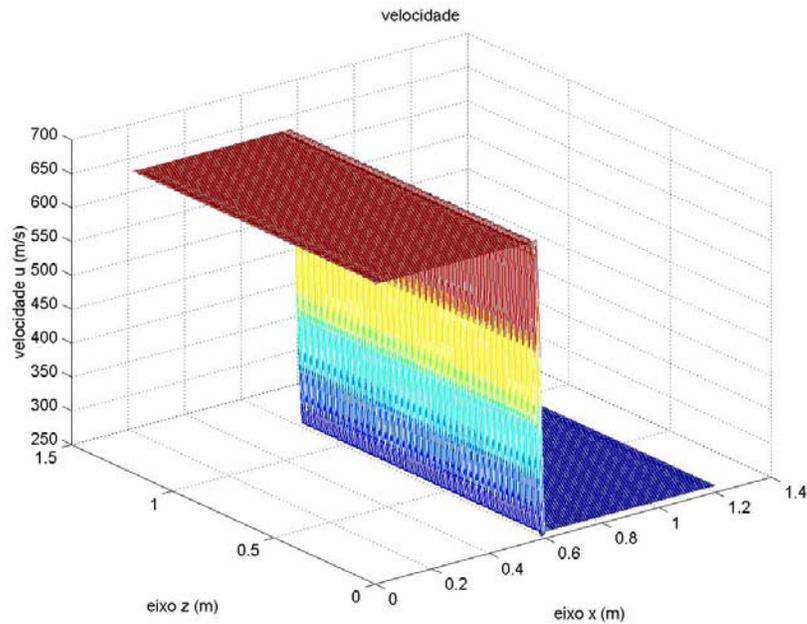


Figura 3 – Comportamento da velocidade u (normal ao choque) – malha computacional com 1600 células.

O segundo caso analisa o problema da difusão numérica, ou falsa difusão, que pode ser criada artificialmente pelo método numérico, através da simulação de uma interface de descontinuidade de temperatura, de um escoamento supersônico, isto é, simula um degrau de temperatura formado através das condições de contorno impostas pelo problema. Esse fato é verificado principalmente em problemas com convecção predominante. A figura 4 mostra o domínio computacional do problema.

As condições de contorno adotadas para o problema, em questão, estão descritas a seguir. As condições de contorno da região 1, dadas pela face esquerda do domínio computacional, são: Temperatura $t_1 = 310$ k; pressão $p_1 = 1$ bar; velocidade na direção do eixo x , $u_1 = 500$ m/s e velocidade na direção do eixo z , $w_1 = 500$ m/s. As condições de contorno da região 2, dadas pela face inferior do domínio computacional, são: temperatura $T_2 = 290$ k; pressão $p_2 = 1$ bar; velocidade na direção do eixo x , $u_2 = 500$ m/s e velocidade na direção do eixo z , $w_2 = 500$ m/s. Com a finalidade de gerar o degrau de temperatura, a

condição de contorno de temperatura da face esquerda é diferente 20°K da condição de contorno de temperatura da face inferior.

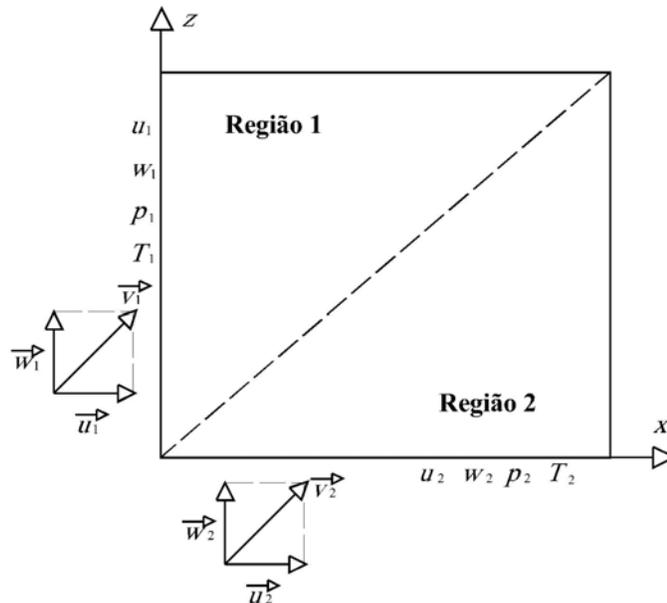


Figura 4 – Domínio computacional (2,0 m x 2,0 m) do problema do degrau de temperatura.

Para este problema, assume-se as seguintes propriedades para o fluido: fluido invíscido, isto é, $\mu = 0$, e condutividade térmica igual a zero, isto é, $k = 0$. Com isto, os termos difusivos da equação da energia são eliminados de forma a não existir nenhum tipo de difusão.

Nessas condições de contorno, as componentes do vetor velocidade do fluido de entrada podem assumir valores distintos. A variação das componentes da velocidade tem por finalidade alterar o ângulo com que o vetor velocidade faz com o eixo x (ângulo θ) e, portanto, a direção relativa entre a malha e a velocidade do fluido. O caso analisado nesta seção tem $\theta = 45^\circ$.

A seguir é mostrado na figura 5, o comportamento da temperatura nas regiões 1, 2 e interface do escoamento supersônico, imposto pelas condições de contorno.

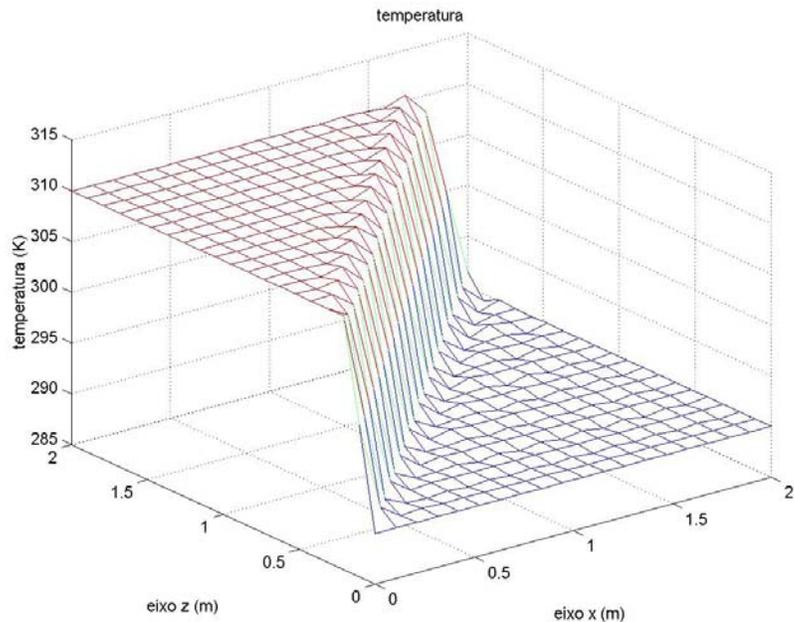


Figura 5 – Comportamento da temperatura – malha computacional com 100 células e grau 4 na expansão das variáveis.

O terceiro e último caso a ser analisado é um escoamento supersônico que incide obliquamente sobre um corpo (superfície), com formação de uma onda de choque oblíqua. Esse caso visa à captura da onda de choque oblíqua, reta e colada ao corpo, com solução não natural ou forçada (solução de choque intenso). O método também foi empregado para verificar à captura da onda de choque oblíqua, reta e colada ao corpo, com solução natural (solução de choque fraco) e para verificar também à captura da onda de choque oblíqua, curva e deslocada do corpo. Apenas a solução de choque intenso é mostrada neste documento.

Este caso, captura da onda de choque oblíqua, reta e colada ao corpo, com solução não natural ou forçada (solução de choque intenso), consiste de um escoamento supersônico, com número de Mach da região 1, ($M_1 = 2,9$), incidente sobre um corpo (superfície) que ocupa 1/3 do contorno inferior. A direção do escoamento em relação a este corpo forma um ângulo $\theta = 11,3^\circ$, figura 6.

Devido à imposição da pressão à jusante do escoamento, região 2, o ângulo de inclinação da onda de choque formada é maior que no caso da solução natural. Portanto, para $M_1 = 2,9$ e $\theta = 11,3^\circ$, segundo **Thompson (1972)**, (tabela de choque oblíquo, apêndice D), tem-se que $p_2 = 9,6$ bar e $\beta = 85^\circ$.

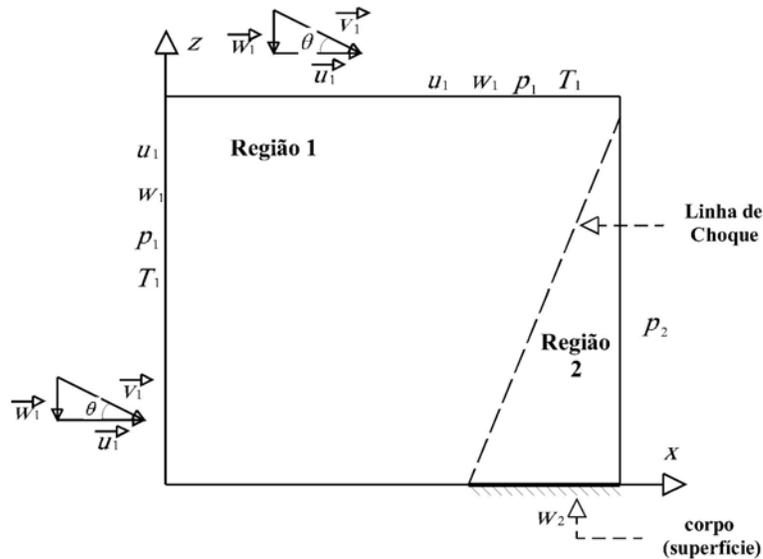


Figura 6 – Domínio Computacional (1,0 m x 1,0 m) do problema do choque oblíquo reto - solução forçada.

A malha computacional empregada é a mesma que a do caso anterior, isto é, 9 células com $\Delta x = \Delta z = 0,33$ m, $\Delta t = 10^{-5}$ s e grau 2 na expansão das variáveis.

As condições de contorno adotadas para esse caso são condições típicas de um escoamento supersônico. Para a obtenção da solução forçada (solução de choque intenso), isto é, além das condições de contorno à montante do escoamento (condições de contorno que caracterizam a solução natural) também é fornecida a pressão p_2 (face esquerda do domínio computacional) da região 2, posterior à linha de choque.

O objetivo deste teste é verificar que, mantendo-se as condições de contorno da região 1 e adicionando a condição de contorno de pressão p_2 da região 2 ($p_2 = 9,6$ bar), obtém-se um ângulo de inclinação β da onda de choque formada nesse escoamento igual a

85°, segundo **Thompson (1972)**. Essas condições formam a solução forçada (solução de choque intenso) para o problema do choque oblíquo.

A seguir é mostrado na figura 7, a captura da onda de choque oblíqua, reta e colada ao corpo, com solução não natural ou forçada (solução de choque intenso).

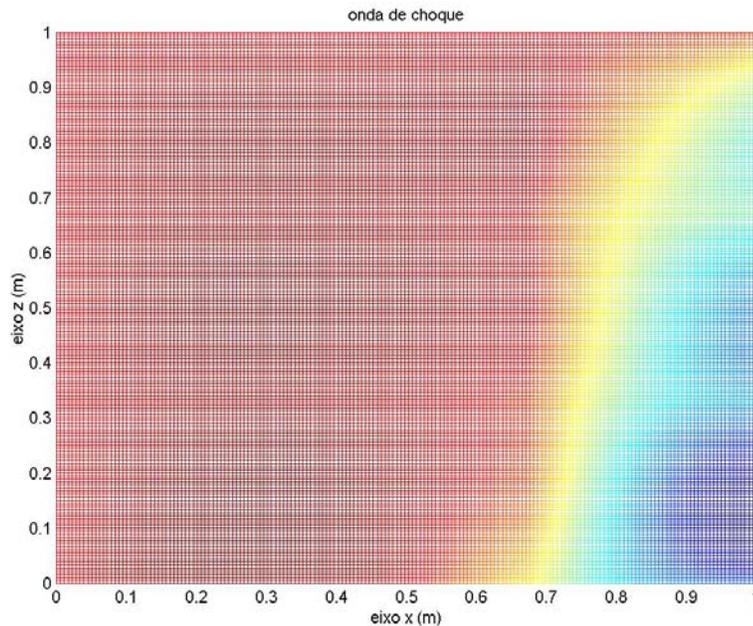


Figura 7 – Comportamento da onda de choque – choque oblíquo reto (solução forçada), utilizando grau 2 na expansão das variáveis.

CONCLUSÃO

Simulações de escoamentos supersônicos, incidentes obliquamente sobre um corpo, foram realizadas para verificar a capacidade do método numérico desenvolvido em simular, adequadamente, escoamentos de fluidos compressíveis em alta velocidade e de capturar ondas de choque.

Através da análise feita, em função dos resultados obtidos nas simulações realizadas, pode-se concluir que o objetivo deste trabalho foi alcançado de maneira satisfatória, pois os resultados obtidos com o método desenvolvido neste trabalho foram

qualitativamente e quantitativamente bons, quando comparados com os resultados teóricos encontrados na literatura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BROOKS, A. N.; HUGHES, T. J. R. Streamline Upwind Petrov-Galerkin Formulation for Convection-Dominated Flows with Particular Emphasis on the Incompressible Navier-Stokes Equations. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, v. 32, pp. 199-259, 1982.

MALISKA, C. R. Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional. ed. LTC-Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro RJ, 1995.

SIMÕES-MOREIRA, J.R. Teoria do Escoamento Compressível. Apostila da disciplina Escoamento Compressível, Departamento de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1º período de 2002.

THOMPSON, P. A. Compressible Fluid - Dynamics. ed. McGraw-Hill, USA, 1972.

ZIENKIEWICZ, O. C.; CHRISTIE, I.; GRIFFITHS, D. F.; MITCHELL, A. R. Finite Element Methods for Second Order Differential Equations with Significant First Derivatives. International Journal for Numerical Methods in Engineering, v. 10, pp. 1389-1396, 1976.

ZIENKIEWICZ, O. C.; MORGAN, K. Finite Elements and Approximation. University of Wales, Swansea, United Kingdom. New York, 1983.

BOLETINS TÉCNICOS

TEXTOS PUBLICADOS

Foram publicados até outubro de 1999, 152 boletins técnicos do PMC relacionados a temas que incluem assuntos de pesquisa do atual Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos

- BT/PMR/9901 – Análise por Elementos Finitos de Transferência de Calor em Elementos Combustíveis Nucleares com Diversos Formatos de Seção Transversal – LUCIANO ABE, JOÃO BATISTA DE AGUIAR
- BT/PMR/9902 – Modelagem de Transdutores Piezelétricos de Potência – MARCELO YASSUNORI MATUDA, JULIO CEZAR ADAMOWSKI
- BT/PMR/9903 – Estudo sobre Escoamentos Críticos em Microorifícios e Capilares – KAZUTO KAWAKITA, MARCOS TADEU PEREIRA
- BT/PMR/9904 – Desenvolvimento e Ensaio de Transdutor Multicomponentes para Medição de Força e Momento – MIGUEL JAIME SANDOVAL RODRÍGUEZ, TARCISIO ANTONIO HESS COELHO
- BT/PMR/9905 – Sistema de Posicionamento Pneumático Rotativo – MARCOS COSTA HUNOLD, EDUARDO LOBO LUSTOSA CABRAL
- BT/PMR/0001 – Análise Dinâmica de Sistemas de Produção Flutuante de Petróleo Através de Redes Neurais Artificiais – JHONNY LEONIDAS MERMAS TIQUILLOCA, MARCELO GODOY SIMÕES, HÉLIO MITIO MORISHITA
- BT/PMR/0002 – Aplicação do Método da Expansão em Funções Hierárquicas na Solução das Equações de Navier-Stokes para Fluidos Incompressíveis – GAIANÊ SABUNDJIAN, EDUARDO LOBO LUSTOSA CABRAL
- BT/PMR/0003 – Aplicação de Redes de Petri Interpretadas na Modelagem de Sistemas de Elevadores em Edifícios Inteligentes – GLADYS D. BASTIDAS GUSTIN, PAULO EIGI MIYAGI
- BT/PMR/0004 – Método de Modelagem e Análise de Sistemas de Manufatura Baseado no Modelo dos Recursos e no Modelo Funcional – ADINAN DE SOUZA, LUCAS ANTONIO MOSCATO
- BT/PMR/0005 – Metodologia para Modelagem de Sistemas Ar Condicionado em Edifícios Inteligentes – EMÍLIA VILLANI, PAULO EIGI MIYAGI
- BT/PMR/0006 – Análise Experimental da Cravação de Âncoras de Carga Vertical – PHILIP VON PRITZELWITZ, EDISON GONÇALVES
- BT/PMR/0007 – Método de Calibração de Câmeras para Criação de Ambiente Virtual – SILVANA APARECIDA GRAMINHO DA SILVA, JUN OKAMOTO JÚNIOR
- BT/PMR/0008 – Análise de Processos de Separação dos Resíduos de Corrosão do Cobre em Meio Aquoso – ANDERSON DE OLIVEIRA FERNANDES, EDISON GONÇALVES
- BT/PMR/0009 – Mancal Magnético do Tipo Atração com Controle Uniaxial – ISAIAS DA SILVA, OSWALDO HORIKAWA
- BT/PMR/0010 – Aplicação dos Conceitos de Confiabilidade à Análise de Falhas e Elaboração de Políticas de Manutenção – IDÉLCIO ALEXANDRE PALHETA CARDOSO, GILBERTO FRANCISCO MARTHA DE SOUZA
- BT/PMR/0011 – Sistema Baseado em DSP para Controle em Tempo Real de Motor Elétrico – SILVIO SZAFIR, MARCELO GODOY SIMÕES
- BT/PMR/0012 – Modelagem Não-Linear do Ensaio de Tração Empregando o MEF – DANIEL BENÍTEZ BARRIOS, EDISON GONÇALVES, JAVIER GARCÍA DE LA FIGAL COSTALES
- BT/PMR/0013 – Sistema de Informação: Estudo de Caso no Fluxo de Materiais para a Fabricação de Blanks – JOSÉ JEAN-PAUL ZANLUCCHI DE SOUZA TAVARES, JOSÉ REINALDO SILVA
- BT/PMR/0101 – Análise do Processo Usinagem Usando o Método dos Elementos Finitos – MELCHOR RODRÍGUEZ MADRIGAL, JOÃO BATISTA AGUIAR
- BT/PMR/0102 – Medição de Viscosidade de Líquidos por Ultra-Som – FLÁVIO BUIOCHI, JULIO CEZAR ADAMOWSKI
- BT/PMR/0103 – Um Ambiente de Ultra Baixas Temperaturas e Campos Magnéticos Super Intensos – RAMON VALLS MARTIN, CARLOS CHIEN CHING TU, NEI FERNANDES DE OLIVEIRA JR.
- BT/PMR/0104 – Formato e Estabilidade do Balão Têxtil no Processo de Torção “Dois por Um” Descendente – JOÃO PAULO PEREIRA MARCICANO, CARLOS CHIENG CHING TU
- BT/PMR/0105 – Monitoramento de Desgaste em Fresas de Topo Através da Medição de Torque – VINICIUS LEAL CARNEIRO DA CUNHA, LUCAS ANTONIO MOSCATO
- BT/PMR/0106 – Análise da Resistência Mecânica de uma Roda de Alumínio – FLÁVIO ARCANJO SANTANA, GILBERTO FRANCISCO MARTHA DE SOUZA
- BT/PMR/0107 – Modelagem Orientada a Processo e Objeto para Sistemas Autônomos de Transporte – FABRÍCIO JUNQUEIRA, PAULO EIGI MIYAGI
- BT/PMR/0108 – Balanceamento Adaptativo e Completo de Mecanismos Planos, Articulados, Cadeia Cinemática Aberta, de Dois Graus de Liberdade – LIANG YONG, TARCISIO ANTONIO HESS COELHO

BT/PMR/0109 - Análise de Resistência ao Escoamento de Vaso de Pressão Autoportante para o Transporte Rodoviário de Produtos Perigosos a Granel – ORLANDO MERSCHMANN JR., GILBERTO FRANCISCO MARTHA DE SOUZA

BT/PMR/0201 – Recuperação de Formas de Objetos Através de Curvas Senoidais – RÉGIS PASINI, OSWALDO HORIKAWA

BT/PMR/0202 – Metodologia de Análise da Influência das Tensões Residuais no Comportamento à Fratura – DANIEL BENÍTEZ BARRIOS, EDISON GONÇALVES

BT/PMR/0203 – Aritmética Intervalar Aplicada em um Modelador de Sólidos B-rep – MARCELO SHIMADA, MARCOS DE SALES GUERRA TSUZUKI

BT/PMR/0204 – Análise do Comportamento Biomecânico da Interação Prótese-Osso Humano – GILBERTO GARCÍA DEL PINO, EDISON GONÇALVES

BT/PMR/0205 – Desenvolvimento de um Sistema de Visão Omnidirecional – VALDIR GRASSI JUNIOR, JUN OKAMOTO JUNIOR

BT/PMR/0206 – Estudo e Implementação de um *Rainbow Range Finder* – LEIJI NISHIDA, OSWALDO HORIKAWA

BT/PMR/0207 – Análise da Influência da Deformação Plástica sobre a Taxa de Corrosão do Cobre Eletrolítico em Água Pura – BYUNG SIK KIM, EDISON GONÇALVES

BT/PMR/0208 – Projeto de Mecanismos Flexíveis usando o Método de Otimização Topológica – CÍCERO RIBEIRO DE LIMA, EMÍLIO CARLOS NELLI SILVA

BT/PMR/0209 – Análise Experimental e Numérico-Computacional da Cravação de Âncoras em Solos Argilosos – GUSTAVO RIBEIRO TESTA, EDISON GONÇALVES

BT/PMR/0210 – Caracterização de Líquidos por Ultra-Som – RICARDO TOKIO HIGUTI, JULIO CEZAR ADAMOWSKI

BT/PMR/0211 – Desenvolvimento Holografia Digital com Aplicação na Análise de Deslocamento em Condições Submersas – JOSÉ LUIS VALIN RIVERA, EDISON GONÇALVES

BT/PMR/0212 - Metodologia para Detecção e Tratamento de Falhas em Sistemas de Manufatura Através de Redes de Petri - LUIS ALBERTO MARTINEZ RIASCOS, PAULO EIGI MIYAGI

BT/PMR/0213 – Sistema para Flexão de Joelho Mecanizada em Órteses de Membros Inferiores – MARKO ACKERMANN, FÁBIO G. COZMAN

BT/PMR/0214 – Projeto, Construção e Testes de um Redutor Planetário de Duplo Estágio a Tração – FABRÍCIO SUNAHARA NAGAHASHI, EDUARDO LOBO LUSTOSA CABRAL

BT/PMR/0215 – Desenvolvimento de Técnicas de Caracterização de Transdutores Piezelétricos – GILDER NADER, JULIO CEZAR ADAMOWSKI

BT/PMR/0301 – Análise de Confiabilidade de um Processo de Manufatura – Aplicação para um Processo de Furação de Precisão – DIEGO MANREZA TOMAZ, GILBERTO FRANCISCO MARTHA DE SOUZA

BT/PMR/0302 – Aplicação de Técnicas de Confiabilidade para Avaliação do Desempenho da Estufa de um Sistema de Pintura – RICHARD TUVACRK, GILBERTO FRANCISCO MARTHA DE SOUZA

BT/PMR/0303 – Confiabilidade na Estruturação de Carrocerias de Veículos – DENIS LUQUE MARTINHS, GILBERTO FRANCISCO MARTHA DE SOUZA

BT/PMR/0304 – Análise de Confiabilidade de Sistemas Hidráulicos Empregados em Prensas: Aplicação para uma Prensa de Repuxo de 250 Toneladas – ÁLVARO CAMARGO PRADO, GILBERTO FRANCISCO MARTHA DE SOUZA

BT/PMR/0305 – Sistematização do Projeto do Controle de Sistemas Produtivos – FRANCISCO YASTAMI NAKAMOTO, DIOLINO JOSÉ DOS SANTOS FILHO

BT/PMR/0306 – Análise da Influência dos Carregamentos Cíclicos sobre o Comportamento Mecânico das Camadas Poliméricas dos Cabos Submarinos Eletro Ópticos – NELSÓN CÁRDENAS OLIVIER, EDISON GONÇALVES

BT/PMR/0307 – Geração de Redes Bayesianas Uniformemente Distribuídas – JAIME SHINSUKE IDE, FABIO GAGLIARDI COZMAN

BT/PMR/0308 – Qualidade Aplicada ao Processo de Colagem de Vidros em Veículos Automotivos – RICARDO CAMILLO, JOÃO PAULO PEREIRA MARCIANO

BT/PMR/0309 – Desenvolvimento de um Sistema Computacional para Avaliação Probabilística da Vida em Fadiga de Componentes Mecânicos – FERNANDO DE FREITAS, GILBERTO FRANCISCO MARTHA DE SOUZA

BT/PMR/0310 – Redes Neurais CMAC Paramétricas : Fundamentos e Aplicações em Processamento de Sinais e Controle de Processos – PAULO EDUARDO MACIEL DE ALMEIDA, MARCELO GODOY DE SIMOÕES

BT/PMR/0311 – Desenvolvimento de um Sistema para Análise Automática do Padrão de Franjas Fotoelásticas Isocromáticas – ANTONIO FRANCISCO GENTIL FERREIRA JUNIOR, OSWALDO HORIKAWA

BT/PMR/0312 – Simulated Annealing Aplicado ao Planejamento de Caminhos para Robôs – VINICIUS RODRIGUES DE MORAES, MARCOS DE SALES GUERRA TSUZUKI

BT/PMR/0313 – Investigações sobre o Acabamento Superficial de Usinagens com Altíssima Velocidade de Corte – IAN FACCIO, MARCO STIPKOVIC FILHO

BT/PMR/0314 – Classificação de Defeitos em Tubos de Gerador de Vapor de Plantas Nucleares Utilizando Mapas Auto-Organizáveis – ROBERTO NAVARRO DE MESQUITA, EDUARDO LOBO LUSTOSA CABRAL

BT/PMR/0315 – Especificando Requisitos de Sistemas com Redes de Petri³ - ESTON ALMANÇA DOS SANTOS, JOSÉ REINALDO SILVA

BT/PMR/0316 – Estudo do Processo de Furação em Aço com Brocas Helicoidais de Aço Rápido – ÉD CLAUDIO BORDINASSI, MARCO STIPKONIC FILHO

BT/PMR/0317 – Projeto e Implementação de uma Plataforma de Testes Aplicada ao Desenvolvimento de Veículos Submarinos não Tripulados – FLÁVIO JOSÉ AGUIAR SOARES, ETTORE APOLONIO DE BARROS

BT/PMR/0318 – Modelagem e Controle de Veículos não Tripulados – ERIC CONRADO DE SOUZA, NEWTON MARUYAMA

BT/PMR/0319 – Projetos de Atuadores Piezelétricos Flexionais Usando o Método de Otimização Topológica – RONNY CALIXTO CARBONARI, EMILIO CARLOS NELLI SILVA

BT/PMR/0320 – Avaliação de Risco de Sistemas Mecânicos: Aplicação para o Sistema Centralizado de Suprimento de Oxigênio em Estabelecimentos Assistenciais de Saúde – CARLOS ROBERTO BURRI, GILBERTO FRANCISCO MARTHA DE SOUZA

BT/PMR/0321 – Development of Dinamically Tuned Gyroscope – DTG – FERNANDO DE CASTRO JUNQUEIRA, ETTORE APOLONIO DE BARROS

BT/PMR/0322 – Contribuição para a Otimização da Usinagem de Cavidades 2 ½ D – LEANDRO COSTA DE OLIVEIRA, MARCOS DE SALES GUERRA TSUZUKI

BT/PMR/0323 – Desenvolvimento de uma Máquina de Compressão-Torção para Medição do Atrito em Processos de Conformação de Chapas Metálicas – CARLOS EDDY VALDEZ SALAZAR, GILMAR FERREIRA BATALHA

BT/PMR/0324 – Reconhecimento Automático de Locutor em Modo Independente de Texto por Self-Organizing Maps – ALEXANDRE TEIXEIRA MAFRA, MARCELO GODOY SIMÕES

BT/PMR/0325 – Selecting Exact and Approximate Algorithms in Decomposed Bayesian Networks – FABIO T. RAMOS, FABIO G. COZMAN

BT/PMR/0326 – Desenvolvimento de um Sistema Acústico de Posicionamento Submarino – FREDERICO VINES FARIA DE LIMA, CELSO MASSATOSHI FURUKAWA

BT/PMR/0327 – Estimação de Coeficientes Hidrodinâmicos de um Veículo Submarino Semi-Autônomo – JUAN P. JULCA AVILA, JULIO CESAR ADAMOWSKI

BT/PMR/0328 – Simulação Numérica via Elementos Finitos da Conformação de Chapas Metálicas por Pressão Hidráulica (BULGE TEST) – JORGE PAIVA ABRANTES, GILMAR FERREIRA BATALHA

BT/PMR/0329 – Avaliação do Potencial de Utilização de um Mecanismo Paralelo como Máquina Ferramenta – GUILHERME RASZL, TARCISIO ANTONIO HESS COELHO

BT/PMR/0401 – Desenvolvimento de um Sistema Robótico para Cirurgias Minimamente Invasivas – WALTER DE BRITTO VIDAL FILHO, LUCAS ANTONIO MOSCATO

BT/PMR/0402 - Representação de Curvas e Superfícies em Modeladores de Sólido B-Rep – WANG CONGLI, MARCOS DE SALES GUERRA TSUZUKI

BT/PMR/0403 – Controle de um Sistema de Teleoperação Mestre-Escravo com Retorno de Força Aplicado à Robótica Cirúrgica – LUIZ FELIPE DE CASTRO E SILVA VIDAL, LUCAS ANTONIO MOSCATO

BT/PMR/0404 – A Petri-Net Based Object-Oriented Approach for the Modelling and Analysis of Hybrid Systems – EMILIA VILLANI, PAULO EIGI MIYAGE

BT/PMR/0405 – Plastic Buckling of Open Shells Under Impact Loads – SÉRGIO SEIJI TERAMOTO, MARCILIO ALVES

BT/PMR/0406 – Construção de Mapas de Ambiente para Navegação de Robôs Móveis com Visão Omnidirecional Estéreo – CLÁUDIA CRISTINA GHIRARDELLO DECCÓ, JUN OKAMOTO JUNIOR

BT/PMR/0407 – Modelos Constitutivos de Atrito Bi-Dimensionais para Condições de Deslizamento Isotrópicas, Cinemáticas e Anisotrópicas – RENATO TEIXEIRA VARGAS, JOÃO BATISTA AGUIAR

BT/PMR/0408 – Critério de Fadiga Multiaxial para Análise de Fadiga de Alto Ciclo – ACCACIO MORAES NETO, GILBERTO FRANCISCO MARTHA DE SOUZA

BT/PMR/0409 – Axiomatizing Noisy-OR – FABIO GAGLIARDI COZMAN

BT/PMR/0410 – Uma Introdução aos Filtros de Partículas – VICTOR AUGUSTO FERNANDES DE CAMPOS, NEWTON MARUYAMA

BT/PMR/0411 – Proposta de Utilização da Metodologia E-MFG/PFS para a Sistematização do Planejamento de Dispositivos de Fixação – MIGUEL NAVARRO MENA, DIOLINO JOSÉ DOS SANTOS FILHO

BT/PMR/0412 – Manutenção Baseada em Confiabilidade: Ciência e Prática – IDÉLCIO ALEXANDRE PALHETA CARDOSO, GILBERTO FRANCISCO MARTHA DE SOUZA

BT/PMR/0413 - Design of a Split Hopkinson Pressure Bar - FELIPE GALLINA, MARCILIO ALVES

BT/PMR/0414 - Análise Numérico-Computacional das Tensões Residuais Induzidas pelo Jateamento com Granalha - MIGUEL ANGEL CALLE GONZALES, EDISON GONÇALVES

BT/PMR/0415 – Desenvolvimento de um Novo Conceito de Produto: Sensor de Nível de Combustível para Tanques de Motocicletas – NELSON SHOJI NISHIMURA, LUCAS ANTONIO MOSCATO

BT/PMR/0416 - Estudo do Processo de Hidroconformação de Tubos - CRISTIANE SANTONI, GILMAR FERRERIRA BATALHA

BT/PMR/0417 - Análise Experimental da Confiabilidade da Ferramenta no Processo de Furação - CARMEN ELENA PATIÑO RODRIGUEZ, GILBERTO FRANCISCO MARTHA DE SOUZA

BT/PMR/0418 - Método de Degeneração para o Projeto do Controle de Sistemas Produtivos - JULIO ARAKAKI, PAULO EIGI MIYAGI

BT/PMR/0501 – Projeto de Sistemas de Controle Modulares e Distribuídos – ANDRÉ CÉSAR MARTINS CAVALHEIRO, DIOLINO JOSÉ DOS SANTOS FILHO

BT/PMR/0502 – Formal Verification of the Rafale Landing System –EMILIA VILLANI, PAULO EIGI MIYAGI

BT/PMR/0503 – Ambiente Integrado de Análise de Sistemas de Manufatura – WILSON M. ARATA, PAULO EIGI MIYAGI

BT/PMR/0504 – Modelagem de Sistemas de Controle Distribuídos e Colaborativos de Sistemas Produtivos – CRISTINA TOSHIE MOTOHASHI MATSUSAKI, DIOLINO JOSÉ DOS SANTOS FILHO

BT/PMR/0505 – Metodologia para a Modelagem de Sistemas C³I como SEDS – ROGER VALENCIA REYES, FABRÍCIO JUNQUEIRA, PAULO EIGI MIYAGI

BT/PMR/0506 – Aprendizado Semi-Supervisionado de Classificadores Bayesianos Utilizando Testes de Independência – MARCELO CESAR CIRELO, FABIO GAGLIARDI COZMAN

BT/PMR/0507 – Recuperação de Forma de Peças Estampadas por Luz Estruturada – JULIO TABEGNA, OSWALDO HORIKAWA

BT/PMR/0508 – Construção de uma Rede Bayesiana Aplicada ao Diagnóstico de Doenças Cardíacas – ANDRÉ HIDEAKI SAHEKI, FABIO GAGLIARDI COZMAN

BT/PMR/0509 – Grades de Evidência com Visão Omnidirecional Estéreo – FABIANO ROGÉRIO CORRÊA, JUN OKAMOTO JUNIOR

BT/PMR/0510 - Leis de Similaridade Aplicadas a estruturas Sob Impacto – ROBERTO EIKI OSHIRO, MARCÍLIO ALVES

BT/PMR/0511 - Algoritmos para Inferência em Redes Credais – JOSÉ CARLOS FERREIRA DA ROCHA, FÁBIO GAGLIARDI COZMAN

BT/PMR/0512 - Desenvolvimento de Método Holográfico para Inspeção de Estruturas Submersas – RODRIGO DE SOUZA DIAS, EDISON GONÇALVES

BT/PMR/0513 – Proposta de Procedimento para Análise de Fadiga de Molas Planas – DANIEL MARETTI DE CARVALHO, EDISON GONÇALVES

BT/PMR/0514 – Análise Teórico-Experimental da Corrosão do Cobre em Sistemas de Refrigeração: Modelagem Eletroquímica e Numérico-Computacional – GELSON GOMES FALCÃO FILHO, EDISON GONÇALVES

BT/PMR/0601 – Algoritmo de Reconstrução de Imagens Tridimensionais Através da Tomografia por Impedância Elétrica Baseado no Método de Otimização Topológica – LUIZ AUGUSTO MOTTA MELLO , EMILIO CARLOS NELLI SILVA

BT/PMR/0602 – Derivadas em Redes Bayesianas Usando Eliminação de Variáveis- MATHIAS JUAN PERAZZO, FÁBIO GAGLIARDI COZMAN

BT/PMR/0603 – Machine Overhaul and/or Retrofitting: A Reliability Approach – GUILHERME EDUARDO DA CUNHA BARBOSA, GILBERTO FRANCISCO MARTHA DE SOUZA

BT/PMR/0604 – Desenvolvimento de Processos de Conformação de Chapas usando Simulação Computacional como Ferramenta Integrada no Desenvolvimento de Carrocerias Automáticas- GLEITON LUIZ DAMOULIS, GILMAR FERREIRA BATALHA

BT/PMR/0605 – Interferometria Holográfica e Processamento de Imagens Aplicados à Análise de Deformações – GILVAN BARBOSA DA SILVA, EDISON GONÇALVES

BT/PMR/0606 – Proposta de Algoritmo para a Redução da Malha de Polígonos em Modelos Sólidos B-Rep- WANG GONGSHI, MARCOS DE SALLES GUERRA TSUZUKI

BT/PMR/0607 – Inteligência de Exames Aplicada na Síntese de Estratégias de Caça em ambiente Tridimensional – EMILIANO GONÇALVES DE CASTRO, MARCOS DE SALLES GUERRA TSUZUKI

BT/PMR/0608 – Estimacão de Trajetórias Terrestres Utilizando Unidade de Medição Inercial de Baixo Custo e Fusão Sensorial- DOUGLAS DANIEL SAMPAIO SANTANA, CELSO MASSATOSHI FURUKAWA

BT/PMR/0609 – An open Distributed Systems Approach for Building Automation – GLADYS DEIFAN BASTIDAS GUSTÍN, PAULO Eigi Miyagi

BT/PMR/0610 – Projeto Otimizado de Micromotor um Eletrostático – HUMBERTO FERREIRA VINHAIS, EMILIO CARLOS NELLI SILVA

BT/PMR/0611 – Fundamentos da Realimentação das Informações pela manufatura Informada – JOSÉ JEAN-PAUL ZANLUCCHI DE SOUZA TAVARES, JOSÉ REINALDO SILVA

BT/PMR/0612 – Intra and Intermode Consistency in the Representation of the Semantics of Heterogeneous Discrete Event Dynamic System Models- WILSON MUNEMASSA ARATA, PAULO EIGI MIYAGI

- BT/PMR/0613- Análise Numérica de um Transdutor Piezelétrico de Potência para Processamento de Termoplásticos Têxteis – JOÃO BATISTA DA SILVA, JULIO CEZAR ADAMOWSKI
- BT/PMR/0614 - Detecção de Falhas em Sistemas Flexíveis de Montagem Através de Rede de Petri- DAVI LIRA NUNEZ, PAULO EIGI MIYAGI
- BT/PMR/0615 – Extensão Sintática a Modelagem E-MFG com Comunicadores- GUY CLIQUET DO AMARAL FILHO, DIOLINO DOS SANTOS FILHO
- BT/PMR/0616- Projeto de MEMS Eletrotermomecânicos Usando Otimização Topológica- WILFREDO MONTEALEGRE RÚBIO, EMILIO CARLOS NELLI SILVA
- BT/PMR/0617- Modelagem das Tensões Residuais no Processo de Torneamento Duro de um Aço DIN 100CrMn6 e suas Correlações com os Esforços de Corte- SERGIO DELJAICOV , JOÃO BATISTA DE AGUIAR
- BT/PMR/0618 – Mancais Magnéticos Híbridos do Tipo Atração com Controle Uniaxial – ISAIAS DA SILVA, OSWALDO HORIKAWA
- BT/PMR/0619 – The Inferencial complexity of Credal Networks – CASSIO POLPO DE CAMPOS, FÁBIO GAGLIARDI COZMAN
- BT/PMR/0620 –IPE and L2U: Approximate Algorithms for Credal Networks– JAIME SHINSUKE IDE, FÁBIO GAGLIARDI COZMAN
- BT/PMR/0621- Análise Elastoplástica do Colapso de Elementos Tubulares – MIGUEL JAIME SANDOVAL RODRIGUEZ-, JOÃO BATISTA DE AGUIAR
- BT/PMR/0622 – Determinação das Constantes Elásticas de Materiais Compostos por Ultra-Som – DANIEL VERGA BOERI, JULIO CEZAR ADAMOWSKI
- BT/PMR/0623 – Algoritmo para Converter Sólidos CSG em Sólidos B-REP- MURILO ANTONIO SALOMÃO GARCIA, MARCOS DE SALES GUERRA TSUZUKI
- BT/PMR/0624- Investigação sobre o Fresamento da Liga a Base de Níquel- Inconel 625- Depositada em Forma de Revestimento Metálico – MARCELO ACACIO RODRIGUES, AMAURI HASSUI
- BT/PMR/0625 – Modelagem e Otimização de um Robô de Arquitetura Paralela Hexa- SYLVIO CELSO TARTARI FILHO, EDUARDO LOBO LUSTOSA CABRAL
- BT/PMR/0626 – Viability Study of a Piezoelectric Pump Using Computacional Simulation- PAULO HENRIQUE NAKASONE, EMILIO CARLOS NELLI SILVA
- BT/PMR/0627 – Splitting the Unsupervised and Supervised Componentes of Semi-Supervised Learning- CLAYTON SILVA OLIVEIRA, FÁBIO GAGLIARDI COZMAN
- BT/PMR/0628 – Torneamento de Aço 100Cr6 Temperado com Insertos de CBN com e sem Cobertura– GUSTAVO DE SIQUEIRA GALOPPI, MARCO STIPKOVIC FILHO, GILMAR FERREIRA BATALHA
- BT/PMR/0629 – Projeto de Micromecanismos Multifásicos Usando o Método da Otimização Topológica- WAGNER SHIN NISHITANI, EMILIO CARLOS NELLI SILVA
- BT/PMR/0630 – Uma Contribuição á Instrumentação para o Monitoramento do Processo de Fresamento de Topo- CÉSAR ABRAHAM FLORES CISNEROS, GILMAR FERREIRA BATALHA
- BT/PMR/0631 – Análise do Método de Medição de Viscosidade de Líquidos por Ultra-Som usando a Reflexão de Ondas de Cisalhamento – EDIGUER ENRIQUE FRANCO GUZMAN, FLÁVIO BUIOCHI
- BT/PMR/0701- Algoritmo de Sincronização do Tempo de Simulação Aplicado a um Ambiente Distribuído – FABRICIO JUNQUEIRA, PAULO EIGI MIYAGI
- BT/PMR0702 – Modelagem Experimental e Controle de Processo de Hidrocomformação de Tubos (HFT)¹ -ALINE SZABO PONCE, GILMAR FERREIRA BATALHA

**Escola Politécnica da USP - Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos
Edifício de Engenharia Mecânica/Naval - Av. Prof. Mello Moraes, 2231**

Cidade Universitária - CEP 05508-030 - Caixa Postal 61548 - São Paulo - SP- Fone: (0 XX 11) 3091-5337

Fax: (0 XX 11) 3091-5461