

# VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO EM CFD (V&V-CFD)

## Aulas lecionadas em 2017/3

Atualizado em 22 Jan 2018 às 19:51 h

Todos os arquivos citados abaixo estão disponíveis na *internet* no endereço:

<http://servidor.demec.ufpr.br/disciplinas/TM777/>

**ATENÇÃO:** para não reprovar por frequência nessa disciplina, cada aluno poderá faltar no máximo 6 dias de aulas.

### Interessados sobre:

- As atividades desenvolvidas no grupo de pesquisa em *CFD, propulsão e aerodinâmica de foguetes*, da UFPR: ver no *site* da disciplina o arquivo Grupo\_CFD\_fevereiro\_2014\_v8.pdf e o *site* [www.cfd.ufpr.br](http://www.cfd.ufpr.br).
- **Foguetes:** ver o *site* do grupo de foguetes da UFPR em [www.foguete.ufpr.br](http://www.foguete.ufpr.br) e o *blog* <http://fogueteufpr.blogspot.com.br/>.
- **Orientação do prof. Marchi** para Iniciação Científica, Estágio, Trabalho de Conclusão de Curso, Mestrado e Doutorado: ver o arquivo temas\_para\_orientacao\_prof\_Marchi\_janeiro\_2015.pdf no *site* da disciplina.

### Aula 24: PLANO para 16 Fev 2018 (6ª, 13:00 às 15:00 h)

Objetivo: segunda prova sobre os capítulos 6 a 12 do programa da disciplina

### Aula 23: PLANO para 25 Jan 2018 (5ª, 13:30 h)

#### Objetivos:

- Esclarecer dúvidas sobre o trabalho 5
- Teoria sobre validação de soluções numéricas em CFD [Extrato\_norma\_ASME\_VeV\_20-2009.pdf]
- Exemplos práticos relacionados à verificação e validação de soluções numéricas em CFD:
  - Extrato\_TG\_Jeremie\_2006.pdf
  - Extrato\_relatorio\_3\_projeto\_CFD5.pdf
  - 2017\_Bertoldo\_Marchi\_AMM.pdf

#### Leituras complementares:

- Capítulo 10 de Versteeg e Malalasekera (2007)
- Seção 11.1 de Ferziger e Peric (2002)

### Aula 22: PLANO para 23 Jan 2018 (3ª, 13:30 h)

#### Objetivos:

- Teoria e procedimentos recomendados para detectar erros de outra natureza em CFD [outros\_errores.pdf]
- Editorial da ASME Journal of Fluids Engineering (1993) [Freitas\_1993.pdf]

Tarefa (valendo nota) para entregar até o dia 31 Jan 2018: Trabalho-5\_2017-3.pdf

### Aula 21: lecionada em 8 Dez 2017 (13:30-14:53; 9 alunos)

#### Objetivos:

- Teoria sobre erros de arredondamento em CFD [Notas\_de\_aula\_Epi.pdf]
- Método para estimar e reduzir os erros de arredondamento [estimacao\_e\_reducao\_de\_Epi.pdf]
- Como verificar na prática a precisão dos cálculos em Excel [excel\_exemplo.xlsx], Maple [maple\_T.txt] e Fortran [precisao\_Fortran.pdf]
- Exemplos dos efeitos do erro de arredondamento em CFD [Figura\_4.pdf; e efeito\_precisao\_nos\_processador\_compilador\_Diego.pdf]

### Aula 20: lecionada em 6 Dez 2017 (8:30-10:26; 8 alunos)

#### Objetivos:

- Teoria básica sobre erros de iteração [TM701\_CFD1\_capitulo\_3\_2010\_2.pdf (página 15 a 21)]
- Mostrar aplicações de 3 tipos de estimadores do erro de iteração [2003\_Martins\_Marchi\_CILAMCE\_2003.pdf; e aplicativo ICE]
- Mostrar exemplo do aplicativo Richardson 4.1 [relatorio\_1\_Cd\_UDS\_Mach2D\_Jonas.pdf], que está disponível em

[http://servidor.demec.ufpr.br/disciplinas/TM777/Aplicativos/Richardson\\_4p1\\_completo\\_2014\\_01\\_14/](http://servidor.demec.ufpr.br/disciplinas/TM777/Aplicativos/Richardson_4p1_completo_2014_01_14/)

#### Leituras recomendadas:

- teoria\_Richardson\_4p0.pdf

#### **Aula 19: lecionada em 1º Dez 2017 (13:30-15:24; 9 alunos)**

##### Objetivos:

- Mostrar o efeito de malhas quadradas e triangulares sobre MER [2013\_Marchi\_Araki\_Alves\_Suero\_Goncalves\_Pinto\_AMM.pdf]
- Mostrar o efeito da razão de refino de malhas sobre MER [2014\_Giacomini\_Marchi\_CNMAC\_2014.pdf]
- Mostrar o efeito de MER sobre campos [2013\_Giacomini\_Marchi\_Santiago\_CMAC-SE\_2013.pdf]
- Teoria básica sobre erros de iteração [Erros\_de\_Iteracao\_Teoria\_basica.pdf]

##### Leituras recomendadas:

- Teoria sobre soluções numéricas coerentes [tese\_Marchi\_2001.pdf: capítulo 20]; e executar o exemplo do aplicativo ACES 1.0 (soluções numéricas coerentes)
- Estimacao\_erros\_discretizacao\_protocolo\_1p1.pdf

#### **Aula 18: lecionada em 29 Nov 2017 (8:30-10:23; 9 alunos)**

##### Objetivos:

- Mostrar o efeito de algumas aproximações numéricas sobre MER [2009\_Marchi\_Germer\_CILAMCE\_2009.pdf]
- Tipos de variáveis com MER [2013\_Martins\_Marchi\_Novak\_Pinto\_Araki\_Goncalves\_CMAC-SE\_2013.pdf]
- Estimadores de erro de discretização para MER [2014\_Martins\_Marchi\_Araki\_Pinto\_CMAC-SU\_2014.pdf]

#### **Aula 17: lecionada em 24 Nov 2017 (13:30-15:13; 8 alunos)**

##### Objetivos:

- Alguns tipos de refino de malhas 1D não uniformes de volumes finitos e seus erros truncamento de aproximações numéricas para termos advectivos e difusivos [2000\_Marchi\_Silva\_SIMMEC\_2000.pdf]
- Teoria sobre multiextrapolação de Richardson (MER) [Teoria\_multiextrapolacao\_Richardson.pdf]
- Explicar novas variáveis do programa Richardson 3.2, relacionadas a MER, com o exemplo do programa Peclet 1Dp 1.3 (26 malhas)
- Mostrar o efeito de alguns parâmetros sobre MER [2013\_Marchi\_Novak\_Santiago\_Vargas\_AMM.pdf]

#### **Aula 16: lecionada em 22 Nov 2017 (8:32-10:19; 7 alunos)**

##### Objetivos:

- Aplicar a teoria já vista sobre a advecção permanente de um escalar com fonte [tese\_Marchi\_2001.pdf: capítulo 16]
- Efeito do número de refinamentos em malhas PG [tese\_Marchi\_2001.pdf: tabela 17.6 e texto pertinente nas páginas 249 e 250]
- Aplicar a teoria já vista sobre a difusão permanente de um escalar com fonte [tese\_Marchi\_2001.pdf: capítulo 18]
- Mostrar o efeito da malha sobre a ordem efetiva do erro de discretização em um problema 1D de advecção-difusão resolvido com diferenças finitas [tese\_Marchi\_2001.pdf: capítulo 19]

#### **Aula 15: lecionada em 17 Nov 2017 (13:30-15:27; 9 alunos)**

##### Objetivos:

- Teoria e exemplos de estimativa de erro de discretização em problemas multidimensionais [2005\_Marchi\_Silva\_JBSMSE.pdf]
- Erros de poluição e de truncamento em malhas não uniformes 1D de aproximações numéricas de diferenças finitas para as derivadas de primeira e segunda ordens e média da variável primária [tese\_Marchi\_2001.pdf: página 215 e capítulo 14]
- Tipos de refino de malhas não uniformes de diferenças finitas [tese\_Marchi\_2001.pdf: capítulo 15]

#### **Aula 14: lecionada em 10 Nov 2017 (13:23-15:23; 9 alunos)**

##### Objetivos:

- Receber o trabalho 4
- **Primeira prova sobre os capítulos 1 a 5 do programa da disciplina**

#### **Aula 13: lecionada em 8 Nov 2017 (8:30-10:23; 7 alunos)**

##### Objetivos:

- Mostrar o efeito de aproximações numéricas e variáveis sobre o erro de discretização e sua ordem para a equação de advecção-difusão 1D permanente resolvida com o método de volumes finitos [2009\_Marchi\_Germer\_CILAMCE\_2009.pdf sem MER]
- Mostrar o efeito do número de Peclet e da correção adiada sobre o erro de discretização e sua ordem para as equações de advecção-difusão e Burgers 1D permanentes resolvidas com o método de diferenças finitas [2008\_Marchi\_Alves\_CILAMCE\_2008.pdf]

- Esclarecer dúvidas sobre o trabalho 4
- Mostrar o efeito de normas de vetores sobre a análise de erros de discretização [2013\_Martins\_Marchi\_Pinto\_Araki\_Goncalves\_Grossi\_Guardia\_CMAC-SE\_2013.pdf]

### **Atenção: não haverá aula no dia 3 Nov 2017**

### **Aula 12: lecionada em 1º Nov 2017 (8:30-10:07; 7 alunos)**

#### **Objetivos:**

- Aplicar a teoria já vista sobre a advecção permanente de um escalar com fonte [tese\_Marchi\_2001.pdf: páginas 155 e 156 do capítulo 8 (seção 8.7)]
- Aplicar a teoria já vista sobre a difusão permanente de um escalar com fonte [tese\_Marchi\_2001.pdf: páginas 185 a 198 do capítulo 12 (até a seção 12.6)]
- Esclarecer dúvidas sobre o trabalho 4
- Aplicar a teoria já vista sobre a advecção-difusão permanente de um escalar [tese\_Marchi\_2001.pdf: páginas 200 a 209 do capítulo 13 (até a seção 13.3)]

### **Aula 11: lecionada em 27 Out 2017 (13:30-15:27; 9 alunos)**

#### **Objetivos:**

- Condições suficientes para U confiável no intervalo convergente de pU [tese\_Marchi\_2001.pdf: seções 6.1 a 6.3]
- Resumo da teoria já vista [tese\_Marchi\_2001.pdf: seções I.1 e I.2]
- Erro de truncamento de variáveis secundárias [erro\_variaveis\_secundarias.pdf]
- Apresentar o trabalho 4
- Erros de poluição e de discretização em malhas uniformes 1D de aproximações numéricas para as derivadas de primeira e segunda ordens [tese\_Marchi\_2001.pdf: página 126 e capítulo 7]
- Aplicar a teoria já vista sobre a advecção permanente de um escalar com fonte [tese\_Marchi\_2001.pdf: páginas 136 a 155 do capítulo 8 (até a seção 8.6)]

**Tarefa (valendo nota) para entregar até a aula do dia 10 Nov 2017: Trabalho-4\_2017-3.pdf**

### **Aula 10: lecionada em 25 Out 2017 (8:30-10:18; 8 alunos)**

#### **Objetivos:**

- Envoltórios da solução analítica e do erro de discretização [tese\_Marchi\_2001.pdf: seção 5.2]
- Solução numérica convergente e sua incerteza [tese\_Marchi\_2001.pdf: seção 5.3]
- Teoria básica do programa Richardson 3.0 [Teoria\_basica\_aplicativo\_Richardson.pdf e Richardson\_3p0\_variaveis.f90]

### **Aula 9: lecionada em 20 Out 2017 (13:30-15:22; 10 alunos)**

#### **Objetivos:**

- Receber o trabalho 3
- Definir ordem aparente da estimativa do erro de discretização, ver seu cálculo com base em três soluções numéricas, e ver exemplos [tese\_Marchi\_2001.pdf: seções 4.2 e 4.3]
- Aplicativo Richardson 3.2: mostrar exemplo para destacar Uri, Ubi, Utri, Ud, Ugci e pU com solução analítica [Richardson\_3p2\_32\_bits.zip]
- Definir intervalo de convergência da ordem aparente [tese\_Marchi\_2001.pdf: seção 5.1]
- Definir a série de Richardson [2002\_Marchi\_Silva\_NHT\_B.pdf (páginas 177 e 178)]

### **Aula 8: lecionada em 18 Out 2017 (8:30-10:19; 7 alunos)**

#### **Objetivos:**

- Definir os estimadores de erro de discretização Richardson, Delta, GCI, bicoeficiente, tricoeficiente e multicoeficiente [tese\_Marchi\_2001.pdf: seções 3.2 a 3.5]
- Esclarecer dúvidas sobre o trabalho 3
- Ver exemplos de aplicação dos estimadores de erro de discretização Richardson, Delta, GCI, bicoeficiente e tricoeficiente [tese\_Marchi\_2001.pdf: seção 3.6]

### **Atenção: não haverá aula no dia 13 Out 2017**

### **Aula 7: lecionada em 11 Out 2017 (8:30-10:20; 8 alunos)**

#### **Objetivos:**

- Aplicativo Richardson 3.0: transferir; leia-me; e mostrar padrões de arquivos de dados [Richardson\_3p0.zip]

LEIA-ME\_Richardson\_3p0.txt; Exemplos\_Richardson\_3p0.pdf; Richardson\_3p0.in; Richardson\_3p0\_Teste\_001.in; Teste\_005.Richardson\_3p0]

- Receber o trabalho 2
- Apresentar o trabalho 3
- Aplicativo Richardson 3.0: executar o exemplo de UDS-1 (variável 5) para a derivada de primeira ordem da seção 2.9 da tese, com pL e dpL certos e errados.
- Aplicativo Richardson 3.0: executar mais 3 exemplos da seção 2.9 da tese para a derivada de primeira ordem e média com aproximações CDS (variável 2), DDS-2 (3) e regra do trapézio (4).
- Definir estimativa do erro de discretização de uma variável de interesse e a sua equação geral [tese\_Marchi\_2001.pdf: equação 3.3 e texto pertinente]
- Definir efetividade, confiabilidade e acuracidade de uma estimativa do erro de discretização [tese\_Marchi\_2001.pdf: seção 3.1]

**Tarefa (valendo nota) para entregar até a aula do dia 20 Out 2017: Trabalho-3\_2017-3.pdf**

**Tarefa (sem valer nota):** preparar os arquivos necessários e usar o aplicativo Richardson 3.0 na análise da derivada de primeira ordem da seção 2.9 da tese de Marchi (2001) aproximada com DDS-1 e 11 malhas

### **Aula 6: lecionada em 6 Out 2017 (13:30-15:15; 9 alunos)**

**Objetivos:**

- Definir erro de discretização de uma variável de interesse e a sua equação geral [tese\_Marchi\_2001.pdf: equações 3.1 e 3.2, e texto pertinente]
- Esclarecer dúvidas sobre o trabalho 2
- Definir ordem efetiva do erro de discretização, equação para seu cálculo com base em uma e duas soluções numéricas, prever os valores possíveis, e exemplos [tese\_Marchi\_2001.pdf: seções 4.1 e 4.3]

### **Aula 5: lecionada em 4 Out 2017 (8:34-10:21; 11 alunos)**

**Objetivos:**

- Deduzir o erro de truncamento ( $\epsilon$ ) e suas ordens verdadeiras de algumas aproximações numéricas usadas com o método de volumes finitos para a variável dependente e sua derivada de 1ª ordem [Aproximacoes\_erro\_Volumes\_Finitos.pdf]
- Apresentar o trabalho 2
- Deduzir o erro de truncamento ( $\epsilon$ ) e suas ordens verdadeiras da integral do tipo retângulo com o método de volumes finitos [erro\_integral\_retangulo.pdf]

**Tarefa (valendo nota) para entregar até a aula do dia 11 Out 2017: Trabalho-2\_2017-3.pdf**

### **Aula 4: lecionada em 29 Set 2017 (13:30-15:20; 10 alunos)**

**Objetivos:**

- Receber o trabalho 1
- Apresentar conceitos básicos [tese\_Marchi\_2001.pdf]:
  - Seção 1.3: modelos matemáticos
  - Seção 1.4: variáveis de interesse
  - Seção 1.5: modelos numéricos
  - Seção 1.6: fontes de erro das soluções numéricas
  - Seção 1.7: tipos de estimativa do erro de discretização

### **Aula 3: lecionada em 27 Set 2017 (8:30-10:23; 9 alunos)**

**Objetivos:**

- Definir erros verdadeiros e estimados [TM257\_CFD\_capitulo\_3\_2016-1\_v5.pdf: seções 3.1 e 3.2]
- Esclarecer dúvidas sobre o trabalho 1
- Apresentar conceitos básicos [tese\_Marchi\_2001.pdf]: seção 1.2: motivação

**Tarefa (sem valer nota):** ler a seção 1.1 de tese\_Marchi\_2001.pdf

### **Aula 2: lecionada em 22 Set 2017 (13:32-15:25; 11 alunos)**

**Objetivos:**

- Deduzir o erro de truncamento ( $\epsilon$ ) e suas ordens verdadeiras de algumas aproximações numéricas usadas com o método de diferenças finitas para derivadas de 1ª e 2ª ordens [tese\_Marchi\_2001.pdf: seções 2.4 a 2.7; IMC\_cap\_02.pdf: preâmbulo, seções 2.1 e 2.2, Figura 2.2, seções 2.3.5, 2.3.6 e 2.4.2]
- Deduzir o erro de truncamento ( $\epsilon$ ) e suas ordens verdadeiras da integral do tipo trapézio com o método de diferenças finitas [erro\_integral\_trapezio.pdf]
- Resumo das aproximações numéricas já vistas e suas ordens verdadeiras [IMC\_cap\_02.pdf: Tabela 2.1]
- Apresentar o trabalho 1

- Apresentar exemplos de cálculo de aproximações numéricas e seus erros de truncamento com o método de diferenças finitas [tese\_Marchi\_2001.pdf: seção 2.9]

**Tarefa (valendo nota) para entregar até a aula do dia 29 Set 2017: Trabalho-1\_2017-3.pdf**

**Aula 1: lecionada em 20 Set 2017 (8:37-10:25; 11 alunos)**

**Objetivos:**

- Apresentar o edital sobre a forma de comunicação com os alunos [editai\_ftp\_VeV-CFD\_2017-3.pdf]
- Apresentar o plano de ensino da disciplina [plano\_VeV-CFD\_2017-3.pdf]
- História breve de V&V-CFD: Richardson (1910); editorial Roache (1986); simpósio ASME (1993) com estimador GCI do Roache; editoriais de diversos periódicos (1994:); número especial AIAA (1998); norma AIAA (1998); livro Roache (1998); norma ASME (2009)
- Esta disciplina foi lecionada em: 2001 (VMC), 2007 (seminários), 2010 (V&V-CFD) e 2014.
- Deduzir o erro de truncamento ( $\epsilon$ ) e suas ordens verdadeiras de algumas aproximações numéricas usadas com o método de diferenças finitas para derivadas de 1ª e 2ª ordens [tese\_Marchi\_2001.pdf: capítulo 2 até a seção 2.3]