

ESTUDO EMPÍRICO DO CRESCIMENTO DA SEÇÃO DE CHOQUE HADRÔNICA TOTAL EM ALTAS ENERGIAS



Paulo Victor Recchia Gomes da Silva (precchia@ifi.unicamp.br)

Orientador: Márcio José Menon (menon@ifi.unicamp.br)

INSTITUTO DE FÍSICA GLEB WATAGHIN
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

Serviço de Apoio ao Estudante (SAE/UNICAMP)

Palavras-Chave: Física de Altas Energias - Interações Hadrônicas - Espalhamento Elástico



Resumo

Através de parametrizações analíticas independentes de modelo apresentamos uma descrição empírica dos dados experimentais de seções de choque totais próton-próton (pp) e antipróton-próton ($\bar{p}p$) em termos da energia no centro de massa das colisões. Os resultados indicam a possibilidade de um cruzamento, com a seção de choque pp tornando-se maior que a seção de choque $\bar{p}p$ na região de altas energias. No contexto fenomenológico, esse resultado favorece modelos via troca de Odderon (amplitude predominante ímpar). Apresentamos também as previsões para a seção de choque pp na faixa de energia que está sendo investigada no Large Hadron Collider (LHC), CERN.

1 Introdução

A dependência da seção de choque hadrônica total com a energia das partículas colidentes é um fenômeno ainda não explicado pela Cromodinâmica Quântica, a teoria quântica de campos das interações fortes (hadrônicas). Neste trabalho estudamos parametrizações empíricas (independentes de modelos) para a seção de choque total em colisões próton-próton e antipróton-próton em altas energias (acima de 10 GeV no sistema de centro de massa). Consideramos duas parametrizações consistindo em polinômios do logaritmo natural da energia: (i) um polinômio de segundo grau (com 3 parâmetros livres e baseado na saturação do Limite de Froissart-Martin (FM)) e (ii) um polinômio de primeiro grau somado à uma potência livre do logaritmo (com 4 parâmetros livres e atua como um teste do Limite FM). A partir dos ajustes obtivemos previsões para a seção de choque total próton-próton nas energias de 7 e 14 TeV.

2 Teoria

Baseamos nossa análise em três resultados formais (independentes de modelo) [1]:

- **Teorema Óptico:** Esse teorema relaciona a seção de choque total com a parte imaginária da amplitude de espalhamento elástica F frontal: $\sigma_{\text{tot}} = 4\pi \text{Im}F(\theta = 0)$, onde θ é o ângulo de espalhamento no SCM. Este teorema é um resultado geral de teoria de espalhamento e pode ser demonstrado em Mecânica Quântica Não-relativística, no Eletromagnetismo Clássico bem como num formalismo quântico-relativístico.

- **Limite de Froissart-Martin:** A partir de primeiros princípios, é possível demonstrar o Limite de Froissart-Martin (FM) que estipula um limite superior para o crescimento da seção de choque total em termos da energia das partículas colidentes: $\sigma_{\text{tot}} \leq K(\ln s)^2$, onde K é uma constante e s é uma variável de Mandelstam (quadrado da energia total no SCM).

- **Seções de Choque Partícula e Antipartícula:** Baseado na simetria de cruzamento, podemos definir amplitude de espalhamento elástica pares (+) e ímpares (-) em termos das amplitudes pp e $\bar{p}p$ e, com o Teorema Óptico, seções de choque: $F_{\pm} = (F_{pp} \pm F_{\bar{p}p})/2 \Rightarrow \sigma_{\pm} = (\sigma_{\text{tot}}^{pp} \pm \sigma_{\text{tot}}^{\bar{p}p})/2$. Considerando a diferença $\Delta\sigma = |\sigma_{\text{tot}}^{pp} - \sigma_{\text{tot}}^{\bar{p}p}| = 2\sigma_{-}$, teremos $\Delta\sigma = 0$ se e somente se $\sigma_{-} = 0$, ou seja, existe um predomínio da amplitude par, explicado pela troca de um Pomeron. Caso contrário, existe a troca de um Odderon de tal modo que a contribuição da amplitude ímpar é não nula [1].

3 Metodologia

Os dados experimentais disponíveis para a seção de choque total das colisões pp e $\bar{p}p$ acima de 10 GeV indicam uma dependência aproximadamente parabólica com o logaritmo natural da energia (dados experimentais na Fig. 1). Com base nesse comportamento, consideramos a seguinte parametrização analítica geral:

$$\sigma_{\text{tot}} = a + b \ln(s/s_0) + c \ln^{\gamma}(s/s_0), \quad (1)$$

onde a , b , c e γ são parâmetros livres a serem determinados pelos ajustes e $s_0 = 1 \text{ GeV}^2$ (fixo pela massa do próton). Consideramos 2 variantes de ajustes: $\gamma = 2$ fixo (saturação do limite FM) e γ como parâmetro livre. Utilizamos o código CERN-Minuit para reduzir (ajustar) os dados experimentais coletados no Particle Data Group (PDG) [2] para energias maiores que 10 GeV. Para avaliar a qualidade dos ajustes, utilizamos χ^2 por graus de liberdade (χ^2/gl) e intervalos de confiança [3].

4 Resultados

Os resultados dos ajustes são indicados na Tabela 1: valores dos parâmetros, χ^2/gl e os graus de liberdade para as duas variantes. A partir destes valores e via propagação de erros, determinamos σ_{tot} como função da energia bem como sua região de incerteza, mostradas na Fig. 1 separadamente para pp (a) e $\bar{p}p$ (b). Na Fig. 2 apresentamos os resultados em conjunto para pp e $\bar{p}p$ nos casos de $\gamma = 2$ (a) e γ livre (b).

Tabela 1: Resultados dos ajustes através da parametrização (1) e dados com $\sqrt{s} \geq 10 \text{ GeV}$.

	pp		$\bar{p}p$	
	γ fixo	γ livre	γ fixo	γ livre
a (mb)	$47,3 \pm 1,2$	$47,30 \pm 0,30$	$57,29 \pm 0,97$	$85,53 \pm 0,50$
b (mb)	$-3,80 \pm 0,40$	$-3,801 \pm 0,068$	$-5,15 \pm 0,26$	$-1526,05 \pm 0,13$
c (mb)	$0,403 \pm 0,030$	$0,404 \pm 0,011$	$0,430 \pm 0,017$	$1505,78 \pm 0,13$
γ	2	$1,999 \pm 0,015$	2	$1,004800 \pm 0,000040$
χ^2/gl	0,87	0,88	2,0	1,5
gl	63	62	26	25

Considerando o número de graus de liberdade, os valores de χ^2/gl em todos os casos estão num intervalo de confiança de 98% [3]. Os ajustes indicam um cruzamento das curvas de pp e $\bar{p}p$ (Fig. 2) em energias da ordem de 100 GeV. Entretanto para $\gamma = 2$ não é possível afirmar que este cruzamento realmente ocorre pois a região de cruzamento é sobreposta pelas margens de erro. Já para γ livre, os ajustes apresentam uma região de incerteza menor e a determinação do ponto de cruzamento possui uma confiabilidade estatística maior.

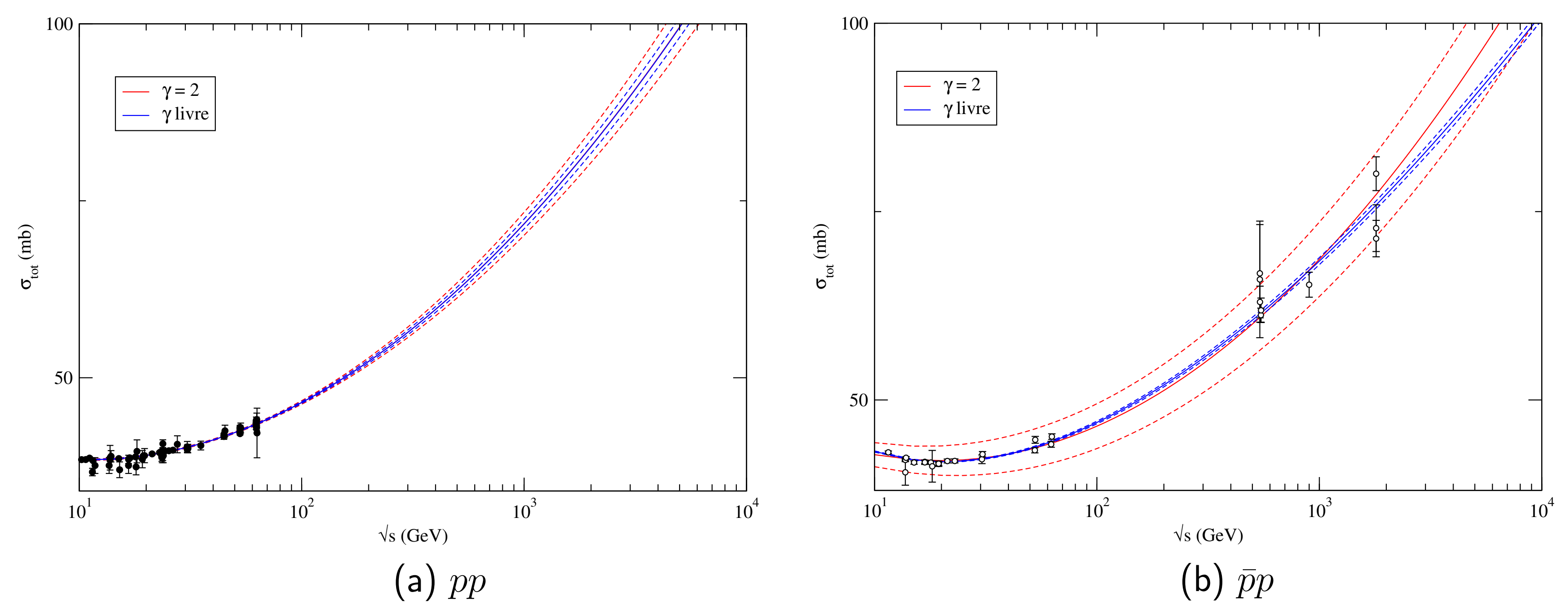


Figura 1: Resultados dos ajustes da seção de choque total em função da energia no sistema de centro de massa (linha cheia) e região de incerteza (linha tracejada) para colisões pp (a) e $\bar{p}p$ (b).

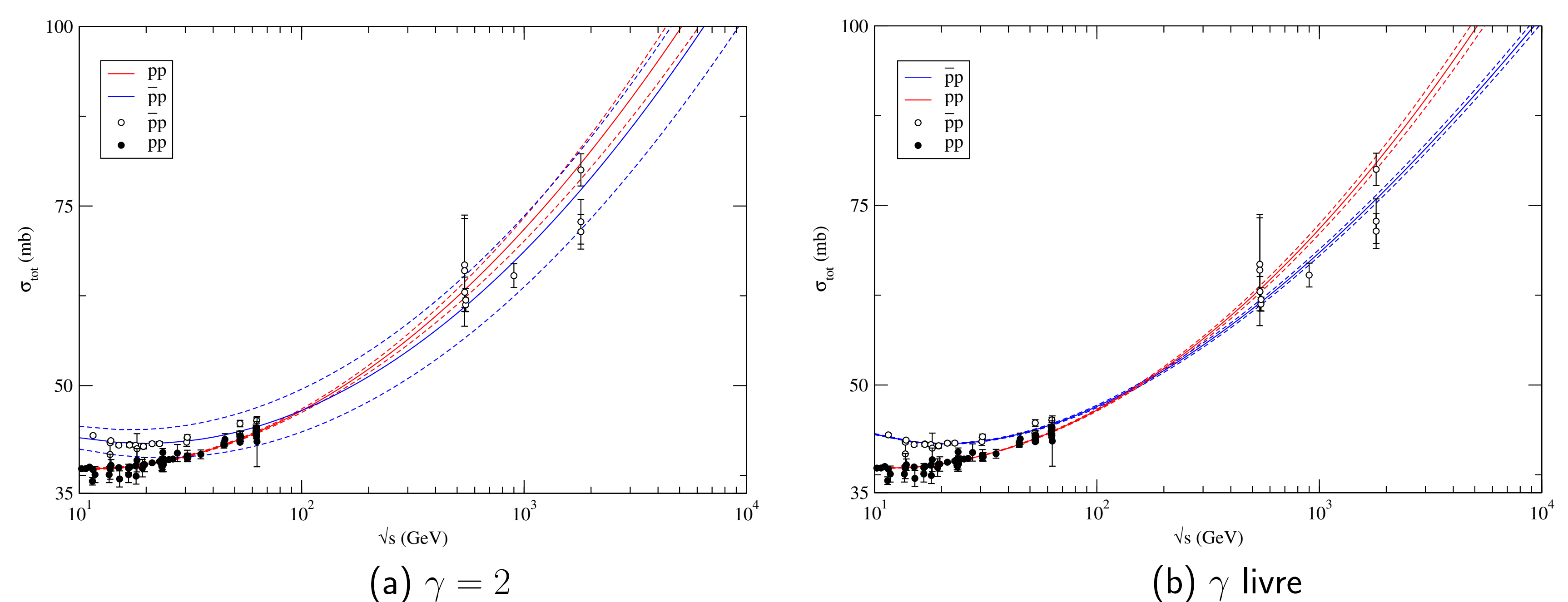


Figura 2: Comparação das curvas de σ_{tot} de pp e $\bar{p}p$ para γ fixo (a) e γ livre (b).

Com os resultados dos ajustes determinamos as previsões para a seção de choque total para colisões pp nas energias de 7 TeV e 14 TeV, que serão medidas pelo acelerador Grande Colisor de Hádrons (LHC/CERN, Suíça) (tabela 2).

Tabela 2: Previsões de σ_{tot}^{pp} (mb) nas energias 7 TeV e 14 TeV.

	γ fixo	γ livre
7 TeV	$106,4 \pm 3,8$	$106,4 \pm 1,6$
14 TeV	$121,7 \pm 4,8$	$121,6 \pm 2,0$

5 Conclusão

Os ajustes dos dados experimentais da seção de choque total próton-próton e antipróton-próton através da parametrização (1) representam descrições estatisticamente consistentes, indicando que o limite de Froissart-Martin é verificado tanto para pp quanto para $\bar{p}p$. Os ajustes para os dados de pp apresentam um resultado mais satisfatório em comparação a $\bar{p}p$, já que o primeiro conjunto apresenta um número maior de dados. Entretanto, o caso $\bar{p}p$ apresenta dados em energias maiores fundamental para o entendimento de σ_{tot} em energias assintóticas. O cruzamento observado nas seções de choque pode ser devido à ausência de dados de pp acima de 62,5 GeV. Nesse sentido os dados a serem obtidos no LHC serão fundamentais para a comprovar ou não esse efeito.

Referências

- [1] V. Barone, E. Predazzi, *High Energy Particle Diffraction*, Springer-Verlag, 2002.
- [2] K. Nakamura *et al.* (Particle Data Group), *J. Phys. G*, **37**, 7A, 2010.
- [3] J. H. Vuolo, *Fundamentos da Teoria de Erros*, Editora Edgar Blücher, 2ª ed., 2000.

Agradecimentos

Agradecemos a Daniel A. Fagundes pela colaboração no desenvolvimento do projeto e ao SAE/UNICAMP pelo financiamento.