

6

Busca de Violação de CP em Dhhh

A finalidade principal deste capítulo é apresentar os resultados da aplicação do método de anisotropia para busca de violação de CP descrito no Capítulo 3. Para entrarmos no estudo de tal método precisamos, em primeiro lugar, garantir que nossa amostra não forneça falsos sinais que poderiam ser atribuídos à violação de CP quando na realidade pertencem a outros aspectos do experimento, e em segundo lugar, necessitamos ensaiar possíveis cenários com presença verdadeira de violação de CP para ter uma ideia da provável assinatura que este fenômeno possa ter e, portanto, alcançar confiabilidade alta na hora de sondar por efeitos deste tipo, seja produto das previsões do Modelo Padrão, como por contribuições de física nova.

Enfatizamos que nossos alvos de busca de violação de CP em charme são os canais $D^\pm \rightarrow K^\mp K^\pm \pi^\pm$ e $D^\pm \rightarrow \pi^\mp \pi^\pm \pi^\pm$ (futuramente), e devemos considerar que as magnitudes de tal violação só poderão ser medidas e convenientemente compreendidas quando excluído qualquer tipo de falsas assimetrias. Posteriormente à procura destas, aplicaremos o estudo de busca de violação de CP nos canais citados acima e apresentaremos os resultados devidamente explicados, sublinhando que, para o canal $D^\pm \rightarrow \pi^\mp \pi^\pm \pi^\pm$, apenas serão apresentados estudos das laterais da região de massa do D^+ , uma vez que ainda não foi feita uma análise na região de sinal.

Com base nas considerações do Capítulo 2 que nos levaram a concluir que pode existir violação de CP nos canais mencionados anteriormente, também sabemos que existem outros produtos no decaimento do méson D que não apresentam violação de CP e portanto são de grande interesse para nosso estudo devido ao conhecimento que se tem dos princípios físicos envolvidos no processo, de suas taxas de decaimento, e adicionado a isto, o baixo nível de background presente nas amostras. Tais canais foram estudados no capítulo 5 e chamados de “canais de controle” porque são usados como referenciais para fazer testes de assimetria até atingir um alto nível de confiança no conhecimento da nossa amostra de dados. Assim, no caso de encontrarmos assimetria nestes canais, uma vez que a física não prevê efeitos deste tipo nos

mesmos, qualquer magnitude de assimetria encontrada poderá ser identificada como provinda de aspectos globais como efeitos de produção ou detecção e conseqüentemente corrigida com o fator de adequado.

6.1

Simulação de Violação de CP

Uma vez feita a seleção dos dados, para ter uma maior confiança nos resultados que serão apresentados, resta apenas uma última questão a ser definida no que diz respeito à confiabilidade estatística dos resultados, para separar os casos que contenham assimetria daqueles que não, como explicitado a seguir.

Segundo discutido no Capítulo 3, rememoramos da seção 3.2.2 que em ausência de assimetria de CP, a distribuição dos valores da significância para cada bin do Dalitz Plot $\mathcal{S}_{CP}(i)$, deve ser uma Gaussiana de largura um e centrada em zero. Ao analisarmos os dados, nosso objetivo é chegar à melhor conclusão possível a partir da informação que temos. Para fazer isso, precisamos garantir que no caso de encontrar algum tipo de assimetria, este valor seja devido exclusivamente a efeitos de violação de CP e não a falsos sinais devido, por exemplo, a flutuações estatísticas da amostra. Imaginemos que ao realizarmos o teste de anisotropia no Dalitz Plot encontremos um valor da média distinto de zero, $\mu \neq 0$. Neste caso, precisamos quantificar numericamente a certeza de que a diferença foi observada devido a uma coincidência estatística de aleatoriedade ou, porque realmente existe uma assimetria de CP na amostra.

Vamos definir uma figura estatística conhecida como o valor-P para diminuir a possibilidade de aceitar como positivo um falso sinal de violação de CP. Esta figura de mérito com valor que varia de zero a um, responde à questão anterior: Se nossa amostra de dados se comporta com médias iguais para D^+ e D^- , qual é a probabilidade de que a amostragem aleatória levaria a uma diferença entre os valores destas médias tão grande ou maior do que o observado no teste de anisotropia? Supondo um nível de significância α , o valor-P faz o papel de discriminante; a hipótese nula ($H_0 =$ ausência de violação de CP) é recusada para valores-P menores que α e não é recusada para valores maiores que esta. O valor-P é calculado por meio de um teste estatístico que em nosso caso vem do valor de χ^2 , a significância da diferença $\mathcal{S}_{CP}(i)$ nos bins do Dalitz Plot (N_{bins}), que juntamente com o número de graus de liberdade, definidos como $NDOF = N_{bins} - 1$, calculamos o valor-P que será usado em nossa análise, definindo $\chi^2 = \sum_{i=1}^{N_{bins}} \mathcal{S}_{CP}^2(i)$.

Esta dissertação tem como objetivo estabelecer se existe ou não evidência de violação de CP em charme com a magnitude predita no Modelo Padrão, ou se esta magnitude é maior do que a teoria prediz. Nossa amostra final para o decaimento $D^\pm \rightarrow K^\mp K^\pm \pi^\pm$ tem 377.748 eventos, com aproximadamente as mesmas quantidades de D^+ e D^- . Perante esta situação surge a possibilidade que se existe violação de CP, não sabemos se é possível vê-la na estatística atual e que isso dependerá da física envolvida.

Precisamos, portanto, de um modelo para descrever o decaimento que estamos estudando, e supor alguns tipos de assimetrias que poderiam se apresentar. A colaboração *CLEO-c* [5] obteve o modelo no qual estão baseados os estudos desta seção, que têm como finalidade simular os possíveis cenários nos quais poderia existir violação de CP, a estatística que seria necessária ter para detectá-la, caso tal violação existisse, e também identificar falsos sinais de violação CP que possam nos levar a conclusões errôneas. Para este propósito, realizamos simulações das distintas possibilidades de violação de CP baseando-nos no modelo citado acima, sabendo que, em princípio, tal violação de CP viria da interferência de K^*K (que pode apresentar fase) com $\phi\pi$. Vamos fazer um modelo simples supondo que K^*K tem amplitude árvore (sem fase fraca) e pinguim (com fase fraca) do tipo:

$$a^+ = a_{T_{K^*K}}^+ e^{i\delta_T} + a_{P_{K^*K}}^+ e^{i\delta_P} \quad (6.1)$$

A ideia é testar diferentes valores nas magnitudes relativas a_P/a_T , fases fortes e fases fracas, tomando como base o modelo de ajuste do *CLEO-c* acima mencionado, para todas as amplitudes mostradas na tabela 3.4. Desta maneira definem-se as expressões para os decaimentos do méson D como a soma de uma amplitude árvore mais uma amplitude pinguim respectivamente:

$$D^+ : a_+ e^{i\delta_+} = a_T \left(1 + \frac{a_P}{a_T} e^{i(\phi+\delta)} \right) \quad (6.2)$$

$$D^- : a_- e^{i\delta_-} = a_T \left(1 + \frac{a_P}{a_T} e^{i(\phi-\delta)} \right) \quad (6.3)$$

Mantendo os valores de D^- fixos, fizemos com que D^+ variasse de acordo com:

- Amplitude pinguim mudando numa fração da amplitude árvore, mantendo esta última fixa

$$a_P = \frac{1}{10}a_T \quad (\text{prob} \sim 1/100) \quad (6.4)$$

$$a_P = \frac{1}{\sqrt{1000}}a_T \quad (\text{prob} \sim 1/1000) \quad (6.5)$$

$$a_P = \frac{1}{200}a_T \quad (\text{prob} \sim 5/1000) \quad (6.6)$$

• A fase fraca muda enquanto mantemos fixa a fase forte, ou a fase fraca mantém-se fixa e mudamos a fase forte. Ensaaiaram-se diferentes valores: para a fase forte foram usados valores em radianos de $\pi/6$, $\pi/4$ e $\pi/3$; mudou-se para cada um destes valores, a fase fraca em graus, com valores 10^0 , 30^0 , 70^0 .

Na prática, a amostra de D^- foi simulada com os valores centrais do CLEO-c, enquanto que as amostras de D^+ tiveram magnitudes e fases diferentes, de acordo a a_{D^+}/a_{D^-} e $(\delta_{D^+} - \delta_{D^-})$, como exemplificado na tabela 6.1. Assim, examinamos diferentes cenários para testar a sensibilidade do método: um cenário com valores exagerados da diferença de fase, que permitiria ver claramente violação de CP; um cenário com valores da diferença de fase congruentes com estimativas teóricas baseadas em nova física; e outro cenário com valores mínimos, para testar o método com baixas diferenças de fase, compatíveis com estimativas do Modelo Padrão.

Em todos os casos expostos realizamos estimativa da diferença que a magnitude de violação de CP poderia ter de acordo com as diferenças na fase; os valores para as distintas magnitudes e fases obtidas estão resumidas na tabela 6.2. A figura 6.1 apresenta, para a amostra simulada *sem fase* de violação de CP, o Dalitz Plot e a significância da diferença $S_{CP}(i)$, da população de D^+ e D^- ; vemos que os valores da significância estão entre -3 e $+3$, uniformemente distribuídos em toda a superfície do Dalitz Plot, como esperado no caso de ausência de violação de CP.

A figura 6.2 apresenta a significância da diferença para uma amostra simulada de 500 000 eventos correspondentes ao decaimento de $D^\pm \rightarrow K^\mp K^\pm \pi^\pm$, com amplitude pinguim igual a uma décima parte da amplitude árvore, com fase forte de $\pi/6$ e fase fraca de 70^0 , a diferença de fase correspondente seria de 9.14^0 , e valor-P = 0, representando aproximadamente 9% de violação de CP¹, o que claramente é um exagero, pois o valor esperado é de, no máximo 1%. Contudo, isto mostra claramente como seria manifesto o efeito de assimetria, caso existisse uma diferença de fase; pode-se ver que os valores da significância não estão uniformemente distribuídos na superfície do

¹Assimetria estimada tomada como: $\frac{|a_+|^2 - |a_-|^2}{|a_+|^2 + |a_-|^2}$

<i>Capítulo 6. Busca de Violação de CP em Dhhh</i>				100
a_P/a_T	Fase Forte (ϕ)	Fase Fraca (δ)	a_{D^+}/a_{D^-}	$\delta_{D^+} - \delta_{D^-}$
$\frac{1}{10}$	$\frac{\pi}{6}$	-70 -30	1.09211 1.04407	-9.14 -4.72
	$\frac{\pi}{4}$	-70 -30	1.13454 1.06452	-7.62 -4.03
	$\frac{\pi}{3}$	-70 -30	1.17017 1.08235	-5.59 -3.08
$\frac{1}{\sqrt{1000}}$	$\frac{\pi}{6}$	-70	1.02958	-2.93
	$\frac{\pi}{4}$	-70	1.04224	-2.41
	$\frac{\pi}{3}$	-70	1.05223	-1.72
$\frac{1}{200}$	$\frac{\pi}{6}$	-70	1.00470	-0.47
	$\frac{\pi}{4}$	-70	1.00665	-0.38
	$\frac{\pi}{3}$	-70	1.00816	-0.27

Tabela 6.1: Magnitudes e fases relativas para D^+/D^- (4ª e 5ª colunas) usadas em simulações para os canais K^*K , de acordo aos valores das amplitudes pinguim e árvore, fase forte e fase fraca (colunas 1, 2 e 3, respectivamente).

Dalitz Plot, e a probabilidade de uma curva gaussiana ajustar corretamente tais valores é muito baixa, como é forçoso que aconteça nestes casos. Previsões recentes [54] da magnitude que a_P/a_T poderia ter, são otimistas nas estimativas do Modelo Padrão, fornecendo valores menores que 5/1000, e de acordo com nossa amostra de 500K em 2010, e os valores da tabela 6.1, esta estatística ainda não é suficiente para observar violação de CP no Modelo Padrão, mas sim caso haja efeitos de nova física tal que $a_P/a_T \sim \frac{1}{30}$.

a_P/a_T	ϕ	μ	σ	χ^2/ndof	P-val
0.1	$\frac{\pi}{6}$	-0.5053 ± 0.141	2.078 ± 0.010	1596.0/223	0
	$\frac{\pi}{4}$	-0.712 ± 0.138	2.017 ± 0.098	2319.4/223	0
	$\frac{\pi}{3}$	-0.795 ± 0.131	1.891 ± 0.092	3045.3/223	0
0.032	$\frac{\pi}{6}$	-0.1734 ± 0.090	1.345 ± 0.064	412.0/223	0
	$\frac{\pi}{4}$	-0.9395 ± 0.104	1.547 ± 0.074	1116.8/223	0
	$\frac{\pi}{3}$	-0.279 ± 0.097	1.443 ± 0.068	546.5/223	0
0.005	$\frac{\pi}{6}$	0.001 ± 0.076	1.004 ± 0.047	225.7/223	0.44
	$\frac{\pi}{4}$	-0.066 ± 0.073	1.096 ± 0.500	263.9/223	0.017
	$\frac{\pi}{3}$	-0.036 ± 0.067	1.007 ± 0.048	227.2/223	0.41

Tabela 6.2: Resultados dos testes de Mirandizing para algumas das amplitudes mostradas na tabela 6.1, com valor na fase fraca de -70^0 , onde podemos comparar os valores-P para $a_P/a_T = 0.1, 0.032$ e 0.005 respectivamente, mostrando claramente violação de CP no primeiro caso. O segundo caso, os valores já poderia ser considerado como nova física, e o terceiro caso é aproximadamente compatível com as previsões do Modelo Padrão.

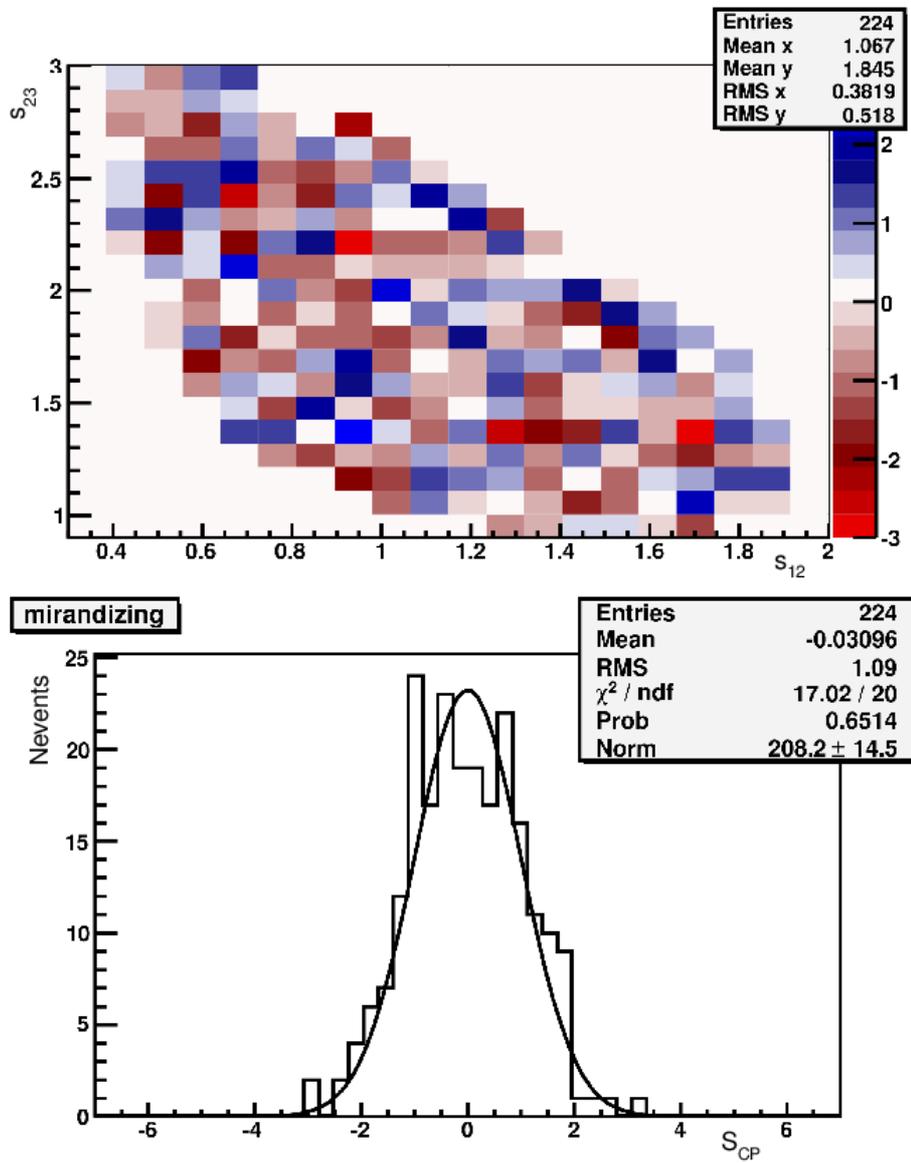


Figura 6.1: Amostra com 500K eventos que representa o padrão dos decaimentos apenas com flutuação estatística. Mostramos o Dalitz Plot da significância da diferença e o ajuste desse valor com uma função Gaussiana, o valor-P da significância foi de 2.5%, compatível com ausência de violação de CP.

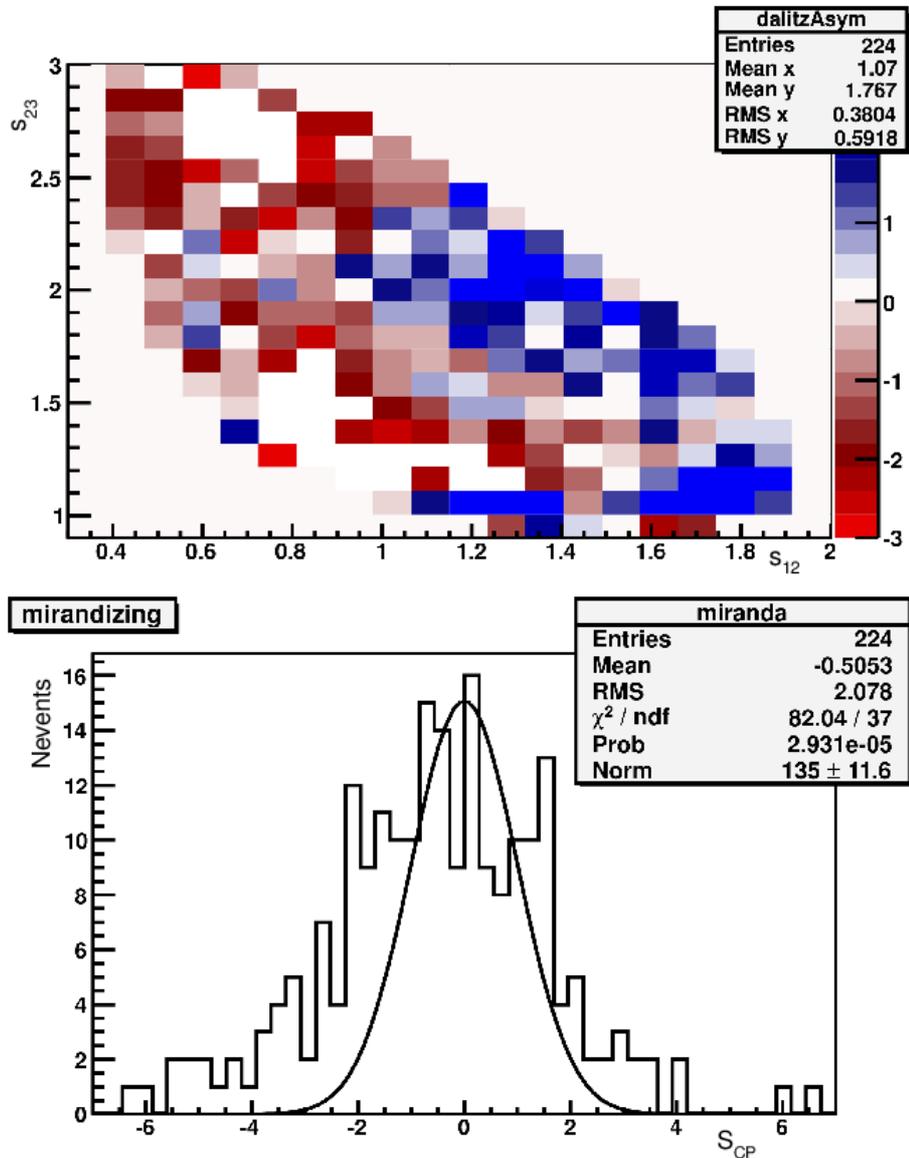


Figura 6.2: Amostra com 500K eventos que simula, para $\phi = \pi/6$ e $\delta_{D^-} = -70^\circ$, uma diferença de $\delta_{D^+} - \delta_{D^-} = -9.14^\circ$, correspondente a $\sim 9\%$ de violação de CP. Acima: Dalitz plot da significância da diferença entre D^+ e D^- . Abaixo: Ajuste da significância com uma Gaussiana, podemos ver que a probabilidade desta distribuição ser ajustada pela curva é quase zero, o que garante a presença de violação de CP.

6.2

Estudo dos Canais de Controle e Background

Após as definições preliminares, procedeu-se à seguinte etapa do estudo, que consistiu em efetuar estudos de Dalitz plot nas regiões onde não existem possibilidades de violação de CP no modelo padrão: os canais de controle favorecidos por Cabibbo $D^\pm \rightarrow K^\mp \pi^\pm \pi^\pm$, $D_s^\pm \rightarrow K^\mp K^\pm \pi^\pm$ e na região das laterais de $D^\pm \rightarrow K^\mp K^\pm \pi^\pm$ e $D^\pm \rightarrow \pi^\mp \pi^\pm \pi^\pm$ (para estudar o comportamento do background), como será mostrado a seguir.

Usamos o mesmo método de análise para o estudo dos canais de controle e a região de sinal, sabendo que todas as amostras passaram pelos mesmos requerimentos de trigger (seção 5.2) e conhecendo os valores da região de sinal para cada uma das janelas. Foram testadas várias binagens (8×8 , 10×10 , 20×20) e para cada bin do Dalitz Plot da amostra a ser testada, requereu-se uma ocupação mínima de 20 candidatos. O valor da variável de Miranda, $\mathcal{S}_{CP}(i)$, é calculado da diferença entre as quantidades de D^+ e D^- , dividida pela incerteza estatística desta diferença. A distribuição total χ^2 é a soma dos quadrados dos valores de \mathcal{S}_{CP} em todos os bins, e o número de graus de liberdade é uma unidade menor que o número de bins do DP. Logo, o valor-P é calculado usando o valor de χ^2/ndof .

6.2.1

Busca de Assimetrias no Canal de Controle KPP

Favorecido por Cabibbo, com baixíssimo nível de impurezas, grande razão de ramificação² e sem fase fraca que permita presença de violação de CP, o decaimento $D^\pm \rightarrow K^\mp \pi^\pm \pi^\pm$ apresenta-se como um cenário favoravelmente sensível para busca de assimetrias falsas vindas principalmente de efeitos de produção ou de detecção.

A análise de anisotropia no Dalitz Plot efetuou-se separadamente para as distintas configurações de trigger (amostras 1, 2 e 3), as combinações entre elas e as polaridades do magneto, na janela de sinal $1853 < m_D < 1885$ MeV/ c^2 e nas laterais definidas no capítulo anterior. Também foi aplicado o método para todas as amostras e ambas as polaridades do magneto.

Os valores da média μ e a largura do ajuste σ , em cada um dos testes realizados, são consistentes com zero e um respectivamente. Este resultado sugere que as diferenças entre D^+ e D^- no Dalitz Plot são, como esperado, provocadas apenas por flutuações estatísticas dos dados. Com base nos valores

²Se comparado com o alvo de estudo, a razão de ramificação do canal $D^\pm \rightarrow K^\mp \pi^\pm \pi^\pm$ está em relação 10 : 1 com o canal $D^\pm \rightarrow K^\mp K^\pm \pi^\pm$, o que se manifesta na diferença estatística entre eles.

esperados pelas simulações de violação de CP, e na análise da hipótese de P-value, chegou-se à conclusão que não existe evidência significativa da presença de qualquer tipo de assimetrias no canal de controle $D^\pm \rightarrow K^\mp \pi^\pm \pi^\pm$ para os dados produzidos no LHCb durante o ano 2010. Em particular, com binagem de 25×25 , obteve-se $\mu = -0.0251 \pm 0.061$, $\sigma = 1.041 \pm 0.043$, $\chi^2/\text{ndof} = 317.9/292$ e valor-P = 0.14. Estes valores podem ser verificados na figura 6.3 e os resultados com todos os valores de μ , σ , χ^2/ndof e o valor-P para esta binagem estão resumidos na tabela 6.3.

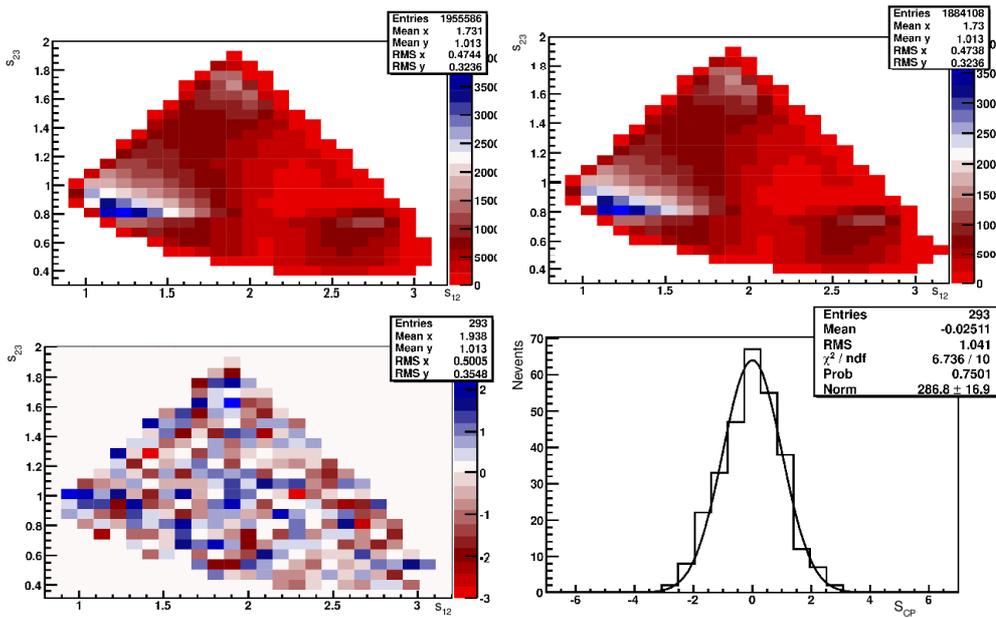


Figura 6.3: Resultados de Mirandizing com binagem 25×25 para a totalidade dos decaimentos de $D^\pm \rightarrow K^\mp \pi^\pm \pi^\pm$. Acima à esquerda: Dalitz plot para o decaimento $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$. À direita: Dalitz plot para o decaimento $D^- \rightarrow K^+ \pi^- \pi^+$. Abaixo à esquerda: Dalitz Plot para a significância da diferença (Mirandizing) entre D^+/D^- . À direita: Ajuste dessa significância com uma função Gaussiana normalizada e centrada em zero.

6.2.2

Busca de Assimetrias no Canal de Controle DsKKP

O Modelo Padrão não prevê violação de CP no decaimento do canal de controle favorecido por Cabibbo, $D_s \rightarrow KK\pi$, o que, junto com o fato de este ter similaridades com a topologia do canal de estudo em termos de estrutura ressonante, estatística e cinemática do decaimento, bem como similares efeitos do detector e background, tornam-no atraente para pôr em prática os testes de assimetria anteriormente explicados.

Foi aplicada a análise de anisotropia no Dalitz Plot para a região de sinal, em cada uma das amostras, para as combinações entre elas, para ambas

<i>Capítulo 6. Busca de Violação de CP em Dhhh</i>					106
Amostra	Polaridade	μ	σ	χ^2/ndof	P-val
Sample 1	MagUp	-0.005 ± 0.050	1.001 ± 0.036	398.4/396	0.46
	MagDown	-0.031 ± 0.052	1.042 ± 0.036	420.5/395	0.18
Sample 2	MagUp	-0.20 ± 0.052	1.030 ± 0.040	423.4/398	0.18
	MagDown	-----	-----	-----	-----
Sample 3	MagUp	0.032 ± 0.049	0.976 ± 0.034	383.6/401	0.72
	MagDown	-0.049 ± 0.052	1.042 ± 0.036	441.7/405	0.10
Samples 1 + 3	MagUp	0.020 ± 0.050	1.007 ± 0.035	413.5/407	0.69
	MagDown	-0.064 ± 0.051	1.029 ± 0.036	433.6/407	0.17
Samples 2 + 3	MagUp	0.007 ± 0.049	0.986 ± 0.035	394.6/405	0.63
	MagDown	-----	-----	-----	-----
Todas	Ambas	-0.0252 ± 0.061	1.041 ± 0.043	317.9/292	0.14

Tabela 6.3: Resultados da análise para $D^\pm \rightarrow K^\mp \pi^\pm \pi^\pm$, teste de Mirandizing feito com binagem de 25×25 , para todas as amostras e algumas combinações entre elas, bem como ambas as polaridades do magneto.

as polaridades do magneto e finalmente para todas as amostras e polaridades do magneto. Também foram investigadas possíveis assimetrias nas regiões de background.

Os resultados dos testes para este canal estão sintetizados na tabela 6.4. Na figura 6.4 apresentam-se os resultados gráficos das provas para todas as amostras e ambas as polaridades do magneto, com valores de $\mu = -0.044 \pm 0.060$, $\sigma = 1.060 \pm 0.042$ e $\chi^2/\text{ndof} = 349.1/309$, o que corresponde a um valor-P de 0.10. Os resultados baseados em testes de Mirandizing indicam que não há evidência de nenhum tipo de assimetria na região de sinal do canal de controle $D_s^\pm \rightarrow K^\mp K^\pm \pi^\pm$, nem na região de background deste.

Amostra	Polaridade	μ	σ	χ^2/ndof	P-val
Sample 1	MagUp	0.066 ± 0.063	0.914 ± 0.045	175.7/208	0.95
	MagDown	-0.013 ± 0.078	0.954 ± 0.055	25.78/23	0.76
Sample 2	MagUp	-0.020 ± 0.064	0.970 ± 0.045	218.4/231	0.71
	MagDown	-----	-----	-----	-----
Sample 3	MagUp	-0.035 ± 0.055	0.923 ± 0.039	242.1/283	0.96
	MagDown	-0.046 ± 0.050	0.917 ± 0.035	10.82/22	0.98
Samples 1 + 3	MagUp	-0.026 ± 0.049	0.926 ± 0.034	341.7/382	0.97
	MagDown	-0.54 ± 0.046	0.907 ± 0.033	7.91/22	0.99
Samples 2 + 3	MagUp	-0.034 ± 0.050	0.943 ± 0.036	311.8/349	0.92
	MagDown	-----	-----	-----	-----
Todas	Ambas	-0.044 ± 0.060	1.060 ± 0.042	349.1/309	0.10

Tabela 6.4: Resultados da análise para $D_s^\pm \rightarrow K^\mp K^\pm \pi^\pm$ para todas as amostras e algumas combinações entre elas, e para ambas as polaridades do magneto, com uma binagem de 25×25 .

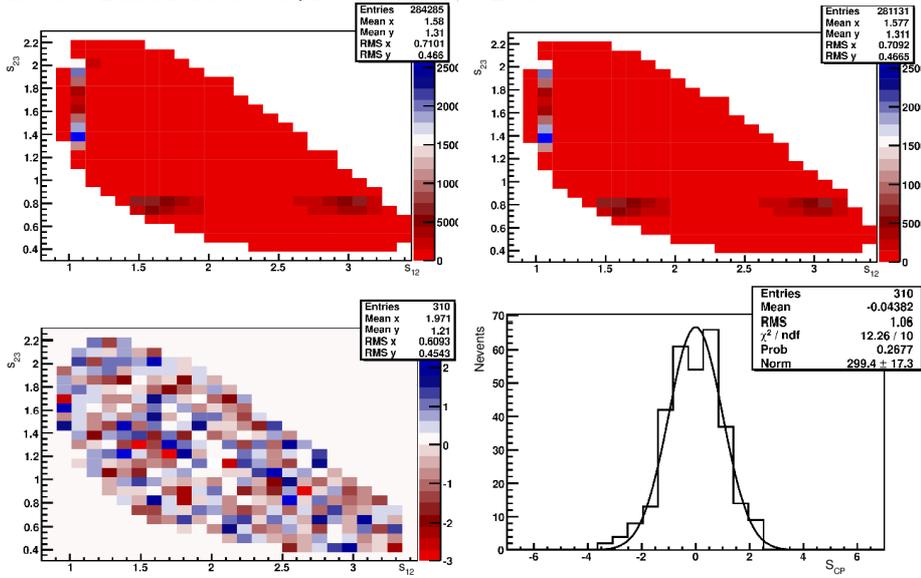


Figura 6.4: Resultados para $D_s^\pm \rightarrow K^\pm K^\mp \pi^+$ para ambas as polaridades do magneto. Acima à esquerda: Dalitz plot para o decaimento $D_s^+ \rightarrow K^+ K^- \pi^+$. À direita: Dalitz plot para o decaimento $D_s^- \rightarrow K^- K^+ \pi^+$. Abaixo à esquerda: Dalitz Plot para a significância da diferença (Mirandizing) entre D^+/D^- . À direita: Ajuste dessa significância com uma função Gaussiana normalizada e centrada em zero.

6.2.3

Busca de Assimetrias no Background do espectro KKP e PPP

A região de background de $D^\pm \rightarrow K^\mp K^\pm \pi^\pm$ está representada com a lateral esquerda entre $(1812 - 1837) \text{ MeV}/c^2$, $(1895 - 1940) \text{ MeV}/c^2$ na região central, e $(2004 - 2032) \text{ MeV}/c^2$ para a lateral da direita. A região de background para o decaimento $D^\pm \rightarrow \pi^\mp \pi^\pm \pi^\pm$ está representada por enquanto com apenas uma única região definida entre $(1905 - 1930) \text{ MeV}/c^2$ devido a que este é apenas um teste preliminar para este canal de decaimento, e o background apresenta comportamento mais ou menos linear na região central escolhida.

Tentou-se verificar a possível contribuição de assimetrias locais pela contaminação de background nos canais $D^\pm \rightarrow K^\mp K^\pm \pi^\pm$ e $D^\pm \rightarrow \pi^\mp \pi^\pm \pi^\pm$, que, no primeiro caso, são derivados de $B \rightarrow D(KK\pi)X$, combinações aleatórias de ϕ com π , da mesma maneira, combinações aleatórias de $K^*(892)$ e um Káon, ou combinações aleatórias de três traços, e no caso do méson D decair em três píons, as contaminações podem ser originadas por efeitos combinatórios de píons, ou pela presença de $K\pi\pi$ erroneamente identificados.

De acordo com o mostrado, não existe evidência significativa de assimetrias de qualquer tipo no background de $D^\pm \rightarrow K^\mp K^\pm \pi^\pm$ nem no background de $D^\pm \rightarrow \pi^\mp \pi^\pm \pi^\pm$, resultados que são apresentados nas figuras 6.5, 6.6 e resumidos nas tabelas 6.5 e 6.6.

Amostra	Polaridade	μ	σ	χ^2/ndof	P-val
Sample 1	MagUp	0.020 ± 0.107	0.972 ± 0.076	37.4/84	0.59
	MagDown	0.034 ± 0.012	1.085 ± 0.089	88.4/74	0.12
Sample 2	MagUp	0.095 ± 0.010	0.871 ± 0.078	48.3/62	0.90
	MagDown	---	---	---	---
Sample 3	MagUp	0.047 ± 0.118	1.072 ± 0.083	95.6/82	0.14
	MagDown	0.004 ± 0.104	0.965 ± 0.073	81/86	0.63
Samples 1 + 3	MagUp	-0.006 ± 0.101	0.959 ± 0.072	81/88	0.69
	MagDown	0.014 ± 0.105	1.006 ± 0.074	92.1/90	0.42
Samples 2 + 3	MagUp	0.017 ± 0.106	0.986 ± 0.075	84.5/86	0.52
Todas	Ambas	-0.032 ± 0.051	0.933 ± 0.036	292.8/335	0.95

Tabela 6.5: Resultados da análise para as laterais de $D^\pm \rightarrow K^\mp K^\pm \pi^\pm$ para todas as amostras e algumas combinações entre elas, bem como ambas as polaridades do magneto.

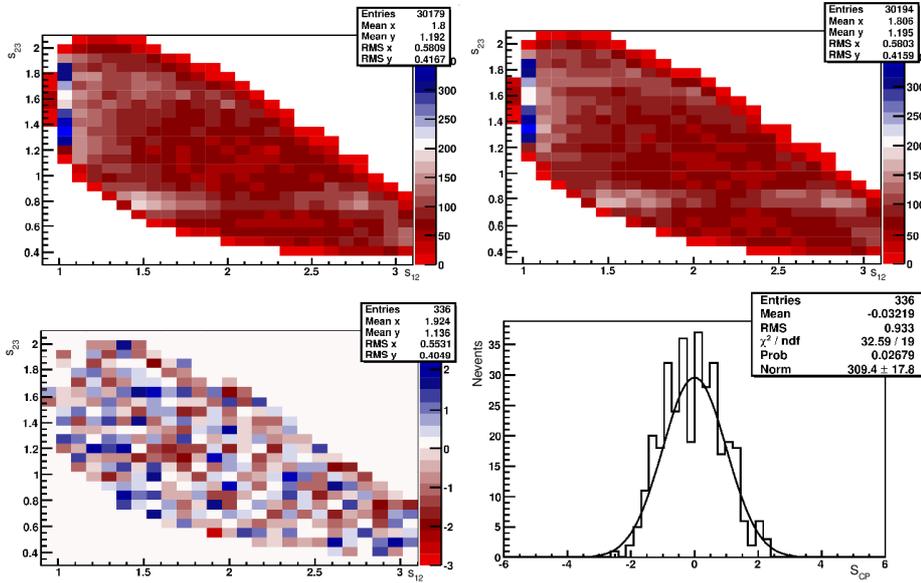


Figura 6.5: Resultados de Mirandizing para o background de $D^\pm \rightarrow K^\pm K^\mp \pi^\pm$, para ambas as polaridades do magneto. De esquerda para direita. Acima: Dalitz plot para o background da região direita do decaimento $D^+ \rightarrow K^+ K^- \pi^+$ e $D^- \rightarrow K^- K^+ \pi^+$. Abaixo: Dalitz Plot para a significância da diferença (Mirandizing) entre as populações de D^+/D^- e ajuste dessa significância com uma função Gaussiana normalizada e centrada em zero.

Amostra	Polaridade	μ	σ	χ^2/ndof	P-val
Sample 1	Up + Down	0.1058 ± 0.123	1.000 ± 0.015	20.7/19	0.35
Sample 3	Up + Down	0.0828 ± 0.068	0.836 ± 0.048	105.2/148	0.99
Samples 1 + 3	Up + Down	-0.024 ± 0.063	0.876 ± 0.045	148.3/192	0.99

Tabela 6.6: Resultados da análise na região de background de $D^\pm \rightarrow \pi^\mp \pi^\pm \pi^\pm$ para todas as amostras e algumas combinações entre elas, bem como ambas as polaridades do magneto e binagem de 25×25 .

Em síntese, após realizada a análise nos canais de controle $D^\pm \rightarrow$

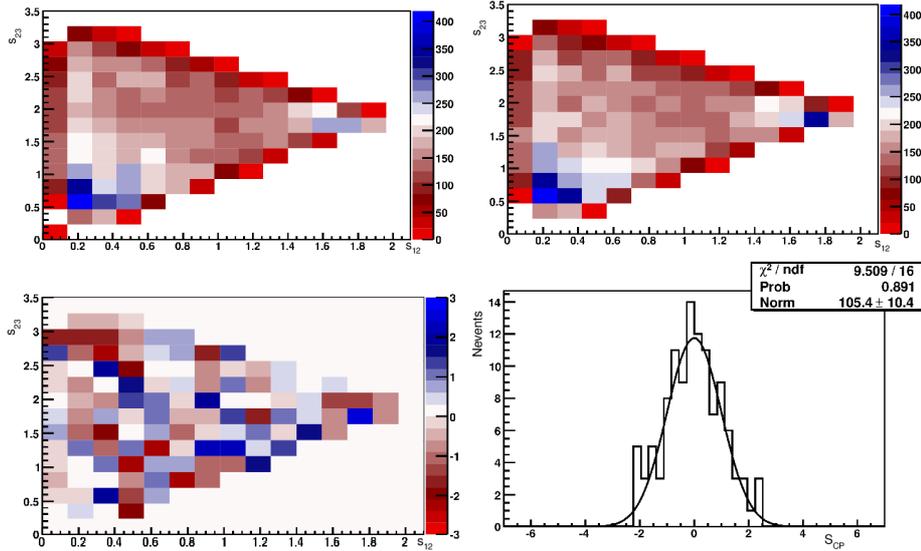


Figura 6.6: Resultados de Mirandizing para o background de $D^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^\mp \pi^\pm$, para ambas as polaridades do magneto. De esquerda para direita. Acima : Dalitz plot para o background da região central dos decaimentos $D^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+$ e $D^- \rightarrow \pi^- \pi^+ \pi^-$. Abaixo: Dalitz Plot para a significância da diferença (Mirandizing) entre as populações de D^+/D^- e ajuste dessa significância com uma função Gaussiana normalizada e centrada em zero.

$K^\mp \pi^\pm \pi^\pm$ e $D_s^\pm \rightarrow K^\mp K^\pm \pi^\pm$, e nas regiões de background de ambos os canais de estudo, $D^\pm \rightarrow K^\mp K^\pm \pi^\pm$ e $D^\pm \rightarrow \pi^\mp \pi^\pm \pi^\pm$, baseados nos testes realizados e na estatística das amostras, temos confiança que, devido ao fato de nenhum tipo de assimetria alheia ao decaimento ser encontrada, se descoberta alguma assimetria entre D^+/D^- nas regiões de sinal dos decaimentos $D^\pm \rightarrow K^\mp K^\pm \pi^\pm$ ou $D^\pm \rightarrow \pi^\mp \pi^\pm \pi^\pm$ dos dados coletados durante 2010, seriam fortes indícios de Violação CP.

6.3

Resultados

Com o panorama exposto e os testes anteriormente descritos, iremos discutir agora os resultados mais relevantes do estudo.

6.3.1

Resultados Para o Decaimento KKP

O escopo e motivação principal desta dissertação é a busca por indícios de violação da simetria de carga e paridade -Violação de CP- no decaimento do méson D^\pm em $K^\pm K^\mp \pi^\pm$ com os dados coletados pelo LHCb durante o ano 2010. Nas seções anteriores foram apresentados os resultados de busca de assimetrias nos canais de controle $D^\pm \rightarrow K^\mp \pi^\pm \pi^\pm$ e $D_s^\pm \rightarrow K^\mp K^\pm \pi^\pm$, e na

região de background do alvo de interesse. Como nenhum tipo de assimetria significativa foi encontrado, podemos ter certeza que, se aparecer alguma diferença significativa (de 1%) entre o decaimento de D^+ e sua partícula conjugada, isto implicaria em profundas consequências no que diz respeito às teorias físicas envolvidas e à maneira como acreditamos compreender as leis que regem o comportamento das partículas elementares e do universo em geral, pois como já foi salientado, o Modelo Padrão prevê valores muito pequenos para esta assimetria, caso ela exista no setor de charme.

Foi discutido anteriormente também que a estratégia seguida consistiu em um estudo “cego” do decaimento $D^\pm \rightarrow K^\pm K^\mp \pi^+$, procurando por assimetrias primeiramente nos canais de controle, nas regiões de background destes, e nas regiões de background de $KK\pi$, para posteriormente “olhar” na região de sinal de nosso interesse, ou seja: aplicar o método de busca de assimetrias de CP por meio da significância da diferença entre os decaimentos conjugados do méson D no Dalitz Plot. Isto foi feito após a colaboração do LHCb autorizar a Colaboração Rio-Oxford para observar o comportamento dos dados na região de sinal.

A heurística utilizada foi escolher primeiro o número de bins a serem utilizados no Dalitz Plot, calcular a significância da diferença $\mathcal{S}_{CP}(i)$ entre as populações de D^+ e D^- em cada bin i . Com este valor, calcula-se $\chi^2/ndof = \sum_i \frac{\mathcal{S}_{CP}(i)}{(Nbins-1)}$ para obter o valor-P que, junto com o ajuste de $\mathcal{S}_{CP}(i)$ com uma distribuição Gaussiana, servirá para testar a violação de CP e emitir juízo acerca da presença ou ausência desta nos dados de 2010.

A síntese com os resultados dos testes para nossa amostra de dados para uma binagem de 25×25 , está apresentada na tabela 6.7. Pode ser observado na figura 6.7 o resultado da aplicação do teste de assimetria para a totalidade dos dados de $D^\pm \rightarrow K^\mp K^\pm \pi^\pm$ com binagem de 25×25 ; o ajuste destes dados com uma função gaussiana fornece os valores $\mu = -0.031 \pm 0.058$ e $\sigma = 1.006 \pm 0.041$, coerentes com uma distribuição centrada em zero e de largura 1. Por outro lado, dos testes de anisotropia obteve-se $\chi^2/ndof = 308.0/303$, que corresponde a um valor-P de 0.41, valores totalmente congruentes com ausência de violação de Carga Paridade. Nas tabelas 6.8 e 6.9 apresentamos um resumo com alguns valores obtidos dos testes, para distintas binagens com a totalidade das amostras para o decaimento $D^\pm \rightarrow K^\mp K^\pm \pi^\pm$, todos eles congruentes com ausência de violação de CP.

Com base nas previsões teóricas de assimetria para o decaimento $D^\pm \rightarrow K^\pm K^\mp \pi^+$, no estudo dos canais de controle $D^\pm \rightarrow K^\mp \pi^\pm \pi^+$, $D_s^\pm \rightarrow K^\pm K^\mp \pi^+$ e as regiões de background de $D^\pm \rightarrow K^\pm K^\mp \pi^+$ dos resultados do trabalho

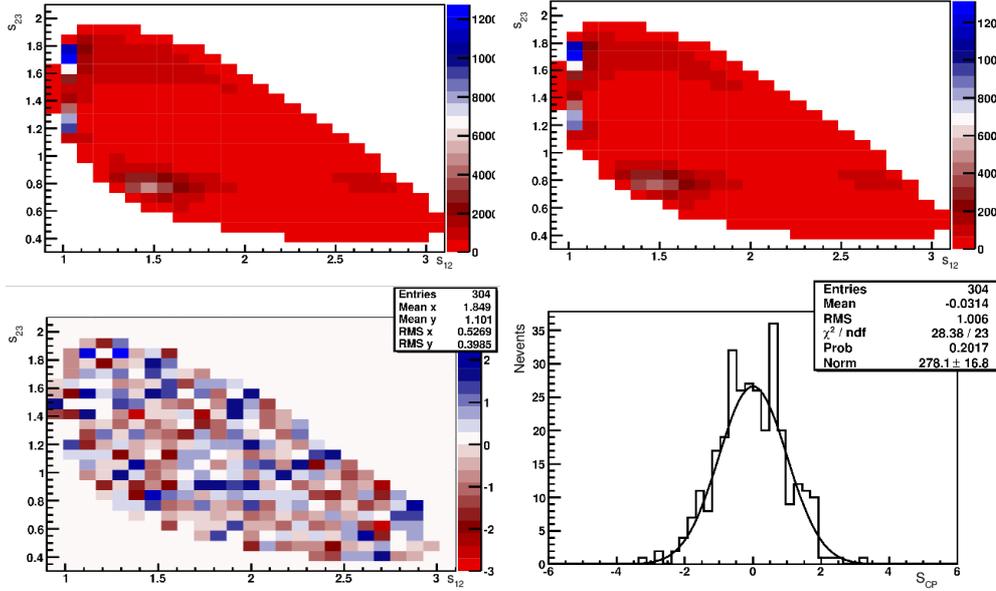


Figura 6.7: Resultados do teste de assimetria para $D^\pm \rightarrow K^\mp K^\pm \pi^\pm$ para binagem de 25×25 . De esquerda à direita apresenta-se, acima, o Dalitz plot para D^+ e D^- , e nas figura de abaixo, a significância da diferença entre as populações de D^+/D^- e o ajuste Gaussiano da distribuição destes valores. Todos os resultados são congruentes com ausência de assimetria CP.

Amostra	Polaridade	μ	σ	χ^2/ndof	P-val
Sample 1	MagUp	-0.009 ± 0.059	0.901 ± 0.042	$186.7/229$	0.98
	MagDown	-0.024 ± 0.068	0.947 ± 0.048	$175.81/195$	0.83
Sample 2	MagUp	0.017 ± 0.067	1.018 ± 0.067	$255.5/239$	0.22
	MagDown	—	—	—	—
Sample 3	MagUp	-0.008 ± 0.064	1.039 ± 0.045	$282.9/261$	0.17
	MagDown	0.004 ± 0.062	1.035 ± 0.044	$302.2/281$	0.18
Samples 1 + 3	MagUp	-0.023 ± 0.059	0.999 ± 0.041	$289.7/289$	0.48
	MagDown	-0.013 ± 0.060	1.027 ± 0.042	$311.5/294$	0.23
Samples 2 + 3	MagUp	-0.001 ± 0.064	1.085 ± 0.046	$333.4/282$	0.02
	MagDown	—	—	—	—
Todas	Ambas	-0.031 ± 0.058	1.006 ± 0.041	$308.0/303$	0.41

Tabela 6.7: Resultados finais da busca de Violação CP no decaimento $D^\pm \rightarrow K^\mp K^\pm \pi^\pm$. Com binagem de 25×25 , os testes foram feitos para combinações de todas as amostras com às polaridades do magneto. Não se encontraram indícios de violação de CP.

Amostra	μ	σ	χ^2/ndof	P-val
Sample 1	0.001 ± 0.075	1.032 ± 0.053	$201.1/188$	0.24
Sample 2	0.008 ± 0.071	0.942 ± 0.051	$144.4/173$	0.84
Sample 3	-0.006 ± 0.071	0.997 ± 0.050	$194.7/195$	0.49
Samples 1 + 3	-0.003 ± 0.074	1.039 ± 0.052	$215.0/198$	0.19
All	0.011 ± 0.072	1.027 ± 0.051	$211.9/200$	0.27

Tabela 6.8: Resultados dos testes de Mirandizing para uma binagem de 20×20 , para o decaimento $D^\pm \rightarrow K^\mp K^\pm \pi^\pm$.

<i>Capítulo 6. Busca de Violação de CP em Dhhh</i>					112
Binagem	Polaridade	μ	σ	χ^2/ndof	P-val
8×8	MagUp	0.094 ± 0.198	0.972 ± 0.105	41.0/42	0.51
	MagDown	-0.111 ± 0.119	0.779 ± 0.084	26.65/42	0.97
	Todas	0.000 ± 0.134	0.888 ± 0.095	34.7/43	0.81
10×10	MagUp	-0.008 ± 0.129	0.994 ± 0.091	58.2/58	0.47
	MagDown	-0.042 ± 0.117	0.893 ± 0.083	46.4/57	0.84
	Todas	-0.012 ± 0.129	0.996 ± 0.091	59.6/59	0.45
15×15	MagUp	0.054 ± 0.0999	1.085 ± 0.0701	141.6/119	0.08
	MagDown	-0.051 ± 0.091	0.998 ± 0.064	119.8/119	0.46
	Todas	0.002 ± 0.089	0.975 ± 0.063	115.0/120	0.61
30×30	MagUp	0.011 ± 0.050	1.013 ± 0.036	416.5/405	0.34
	MagDown	-0.005 ± 0.052	1.033 ± 0.037	425.0/397	0.16
	Todas	0.002 ± 0.051	1.047 ± 0.036	459.7/418	0.08

Tabela 6.9: Testes de Mirandizing para varias binagens e combinações do magneto com todas as amostras do decaimento $D^\pm \rightarrow K^\mp K^\pm \pi^\pm$.

anteriormente exposto para este decaimento, pode-se afirmar, com alto nível de confiança, que com a atual estatística relativa à amostra de dados coletados durante o ano 2010, **não existe evidência que sugira existência de Violação de CP no canal $D^+ \rightarrow K^- K^+ \pi^+$** . Estes resultados foram publicados no paper da referência [5].

6.3.2 Perspectivas Para o Canal PPP

No caso do decaimento $D \rightarrow \pi\pi\pi$, apesar de ser um canal atraente para o estudo de violação de CP, e muito embora nunca tenha sido realizado um estudo completo de busca de assimetrias de CP no Dalitz Plot, devido ao elevado nível de contaminação presente nas amostras dos dados coletados durante o ano 2010, um estudo de violação de CP neste canal é apenas incipiente. O canal de decaimento $D_s^\pm \rightarrow \pi^\mp \pi^\pm \pi^\pm$ é também canal de controle e deve ser estudado. Estes decaimentos serão estudados no ano 2012, aplicando estudos mais profundos com métodos baseados em algoritmos de análise multivariável e mais estatística.