5
VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

Este capítulo tem como objetivo validar o modelo numérico utilizado no capítulo 3, através da comparação numérico-experimental. O aparato experimental procura representar o comportamento axial da coluna de perfuração e a sua influência no dispositivo de impacto (RIMD), de acordo com as simplificações propostas anteriormente. A análise experimental e a identificação dos parâmetros foram realizadas no capítulo 4. Neste capítulo, os parâmetros da bancada serão aplicados ao modelo numérico e comparados com os resultados experimentais.

5.1
Identificação dos Parâmetros do Impacto

Todos os parâmetros da bancada (massas equivalentes, rigidezes e amortecimentos) foram identificados no capítulo 4, com exceção dos parâmetros do impacto. Para tanto, foi realizado um pequeno experimento: o movimento transversal do sistema principal foi travado, através de um suporte. Ver figura (4.2). A superfície de impacto foi colocada na posição de equilíbrio do RIMD (folga 0mm). Utilizando um calibrador de folga, impõe-se uma condição inicial em deslocamento ao sistema, e em seguida mede-se a força de impacto no tempo. Foram escolhidas 2 condições iniciais distintas: 5 e 7mm. Os parâmetros do impacto foram obtidos através da comparação dos resultados experimentais com um modelo numérico de um grau de liberdade. O modelo que descreve a dinâmica do experimento é dado por:

$$\begin{aligned} m_2\ddot{x}_2 + c_2\dot{x}_2 + k_2x_2 &= 0 \qquad para \quad x_2 < 0 \\ m_2\ddot{x}_2 + c_2\dot{x}_2 + k_2x_2 &= -k_c x_2^{n_c}(1+\lambda_c\dot{x}_2) \qquad para \quad x_2 \geq 0 \end{aligned} \tag{5-1}$$

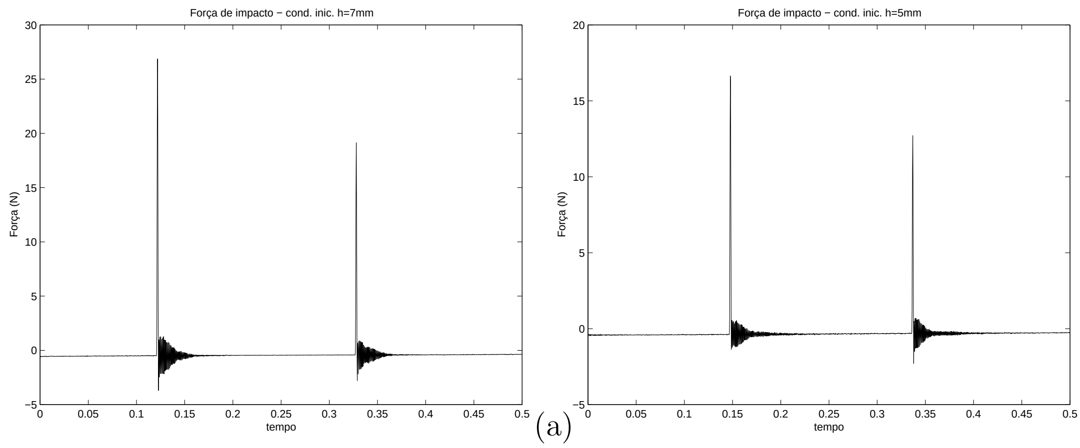
lembrando que o modelo de impacto é o mesmo utilizado no capítulo 3

(Hunt e Crossley (3-2)). Os parâmetros do RIMD são mostrados a seguir:

Tabela 5.1: Parâmetros do RIMD para identificação dos parâmetros de impacto.

Massa	m_2	0.368	kg
Rigidez	k_2	65.6	N/m
Amortecimento	c_2	1.67	Ns/m
Folga	gap	0	mm

Os resultados deste pequeno experimento são mostrados na figura (5.1).



(a) (b)

Figura 5.1: Força de impacto no tempo. a) Condição inicial de 7mm. b) condição inicial de 5mm.

Os parâmetros de impacto que melhor ajustam os dados experimentais são mostrados na tabela (5.2).

Tabela 5.2: Parâmetros do impacto.

Rigidez	k_c	$92.5 \cdot 10^3$	N/m
Razão amortecimento-rigidez	λ_c	8	
Fator não linear	n_c	0.9	

Com estes valores, compara-se a resposta numérica com os dados experimentais, para as duas condições iniciais, conforme mostrados nas figuras (5.2) e (5.3).

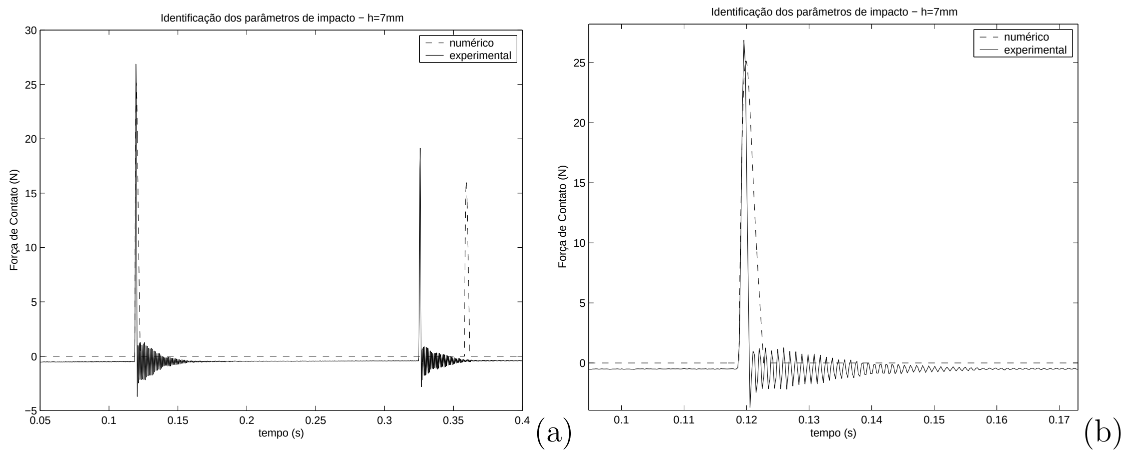


Figura 5.2: Identificação dos parâmetros do impacto. Condição inicial de 7mm.

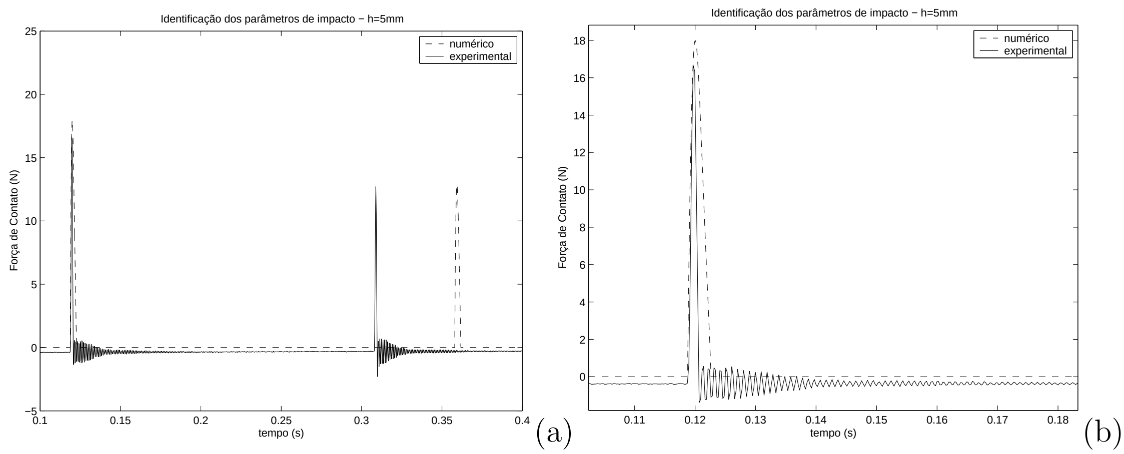


Figura 5.3: Identificação dos parâmetros do impacto. Condição inicial de 5mm.

A partir dos gráficos, verifica-se que o modelo numérico, para descrever o impacto, é capaz de estimar satisfatoriamente o valor máximo da força de impacto. Entretanto, o modelo numérico apresenta dois fatores negativos: o primeiro diz respeito ao impulso da força de impacto durante o choque, isto é, a área sob a curva da força de impacto no tempo. O modelo numérico utilizado não é capaz de representar o modelo experimental, a partir do momento que a força de impacto passa pelo seu valor máximo. Isto implica que o impulso da força de impacto, ou seja:

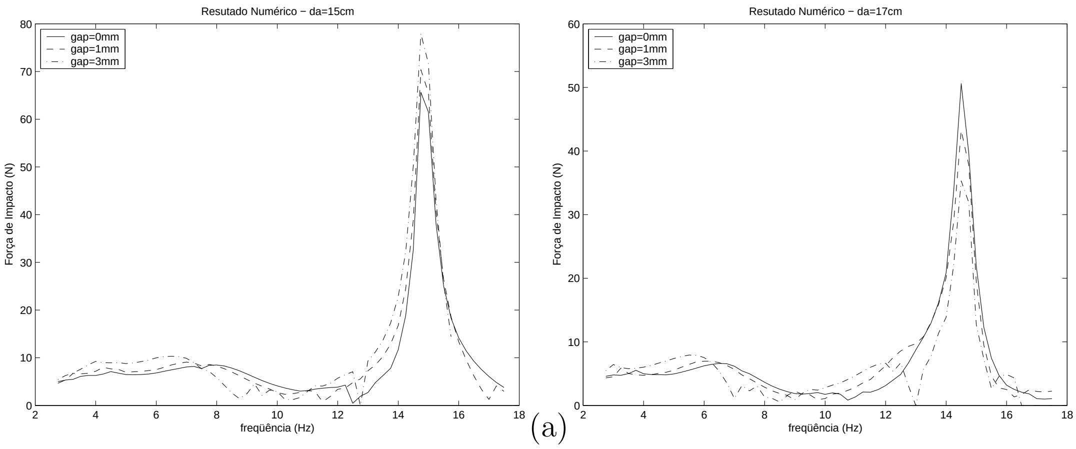
$$Imp = \int_{impacto} F_i \, dt \tag{5-2}$$

é maior no modelo numérico que no caso experimental. Esta discrepância, após vários impactos, pode levar a resultados que não representam a situação real. O outro fator leva em consideração o intervalo entre os impactos. Em ambos os casos (condições iniciais de 5 e 7mm), o impacto, no caso experimental ocorreu antes do previsto pelo modelo numérico, sendo o intervalo de tempo entre os impactos (experimental *versus* numérico) 0.05s. Esta escala de tempo é muito maior que a duração do impacto (em torno de 0.002s). Portanto, a justificativa para tal ocorrência não reside numa inconsistência do modelo da força de impacto, mas que no sistema real (sistema contínuo), após o choque, a força de impacto (impulsiva) induz vibrações em todos os modos de vibração da viga. Com isso, a energia total do sistema fica distribuída nos diversos modos de vibração, fato este não considerado no modelo numérico, que leva em conta somente um único modo de vibração do sistema. Esta também é a possível razão do fato de que a força de impacto no segundo choque é menor que a força no primeiro impacto, considerando que a dissipação em cada choque não é significativa, se comparado ao decaimento da força de impacto.

Um último fator a ser relatado aqui considera que os parâmetros do modelo de impacto são conseqüência da geometria e do material da superfície de impacto, de forma que os parâmetros do impacto não mudam com a velocidade de aproximação do RIMD.

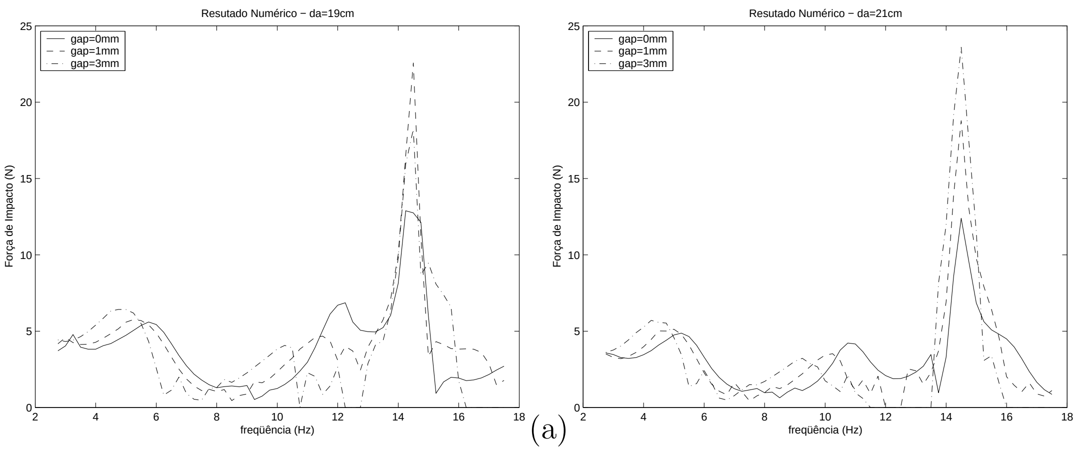
5.2 Resultados Numéricos

Resolvendo as equações (3-6) e (3-7), utilizando os parâmetros identificados nos capítulos 4 e 5, obtemos as respostas, no domínio da freqüência, da força de impacto gerada pelo RIMD. A seguir, são mostrados os resultados numéricos para cada uma das distâncias entre acoplamentos estudadas.



(a) (b)

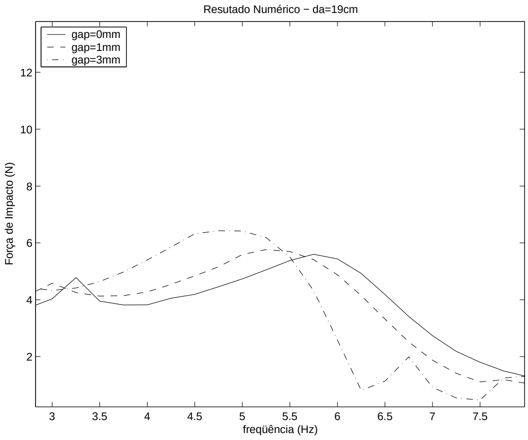
Figura 5.4: Resultados numéricos; F_i *versus* Ω: a) distância entre acoplamentos 15cm; b) distância entre acoplamentos 17cm.



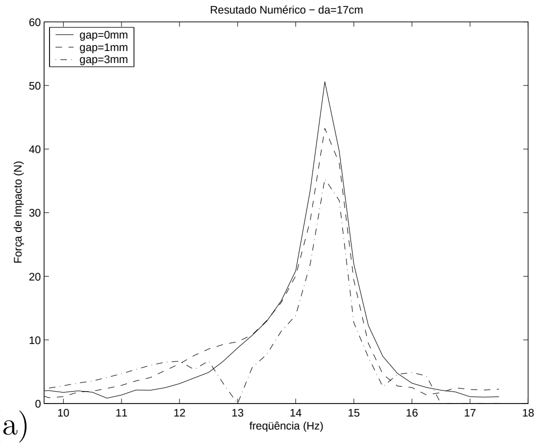
(a) (b)

Figura 5.5: Resultados numéricos; F_i *versus* Ω: a) distância entre acoplamentos 19cm; b) distância entre acoplamentos 21cm.

Analisando os gráficos, qualitativamente, tendo como base os resultados experimentais encontrados no capítulo 4, verificamos que o modelo é capaz de reproduzir alguns fenômenos encontrados experimentalmente, entre eles: as duas ressonâncias, a diferença de força máxima entre os modos de vibração, a transição da primeira freqüência natural conforme a mudança da folga e a não variação da segunda freqüência natural com a folga. Estes dois últimos fenômenos podem ser melhor visualizados na figura (5.6).



(a)



(b)

Figura 5.6: Resultados numéricos; F_i *versus* Ω: a) distância entre acoplamentos 19cm (detalhe - primeiro modo); b) distância entre acoplamentos 17cm (detalhe - segundo modo).

5.3 Comparação Numérico-Experimental

Nesta seção, cada uma das combinações rigidez/folga estudadas experimentalmente no capítulo 4, são comparadas com a simulação numérica. Os resultados são mostrados conforme a seguir.

5.3.1 Distância entre acoplamentos de 15cm

Primeiramente, são mostradas as comparações numérico-experimentais para a distância entre acoplamentos de 15cm.

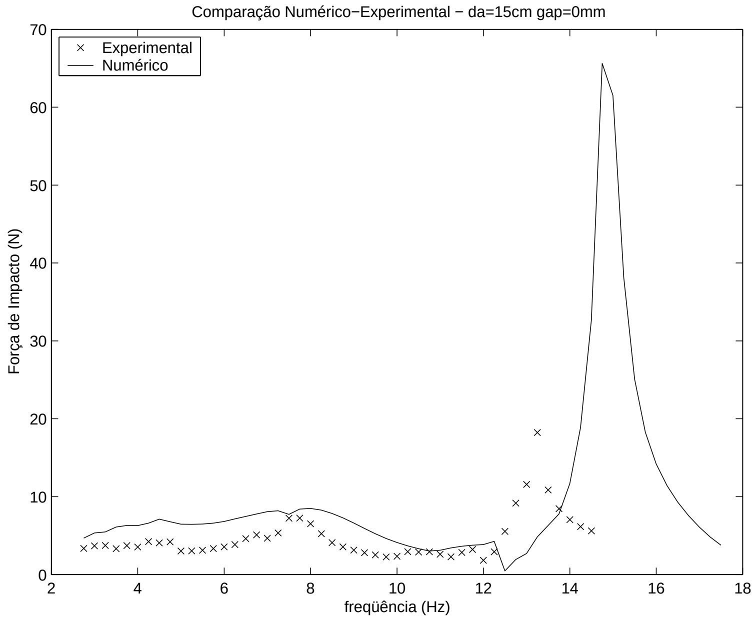


Figura 5.7: Comparação numérico-experimental; distância entre acoplamentos 15cm; gap 0mm; F_i/F_0 *versus* Ω.

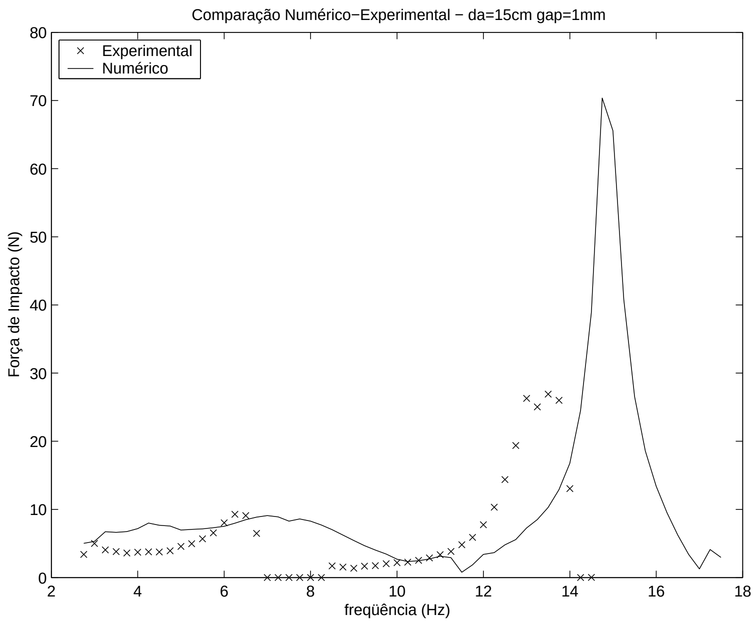


Figura 5.8: Comparação numérico-experimental; distância entre acoplamentos 15cm; gap 1mm; F_i/F_0 *versus* Ω.

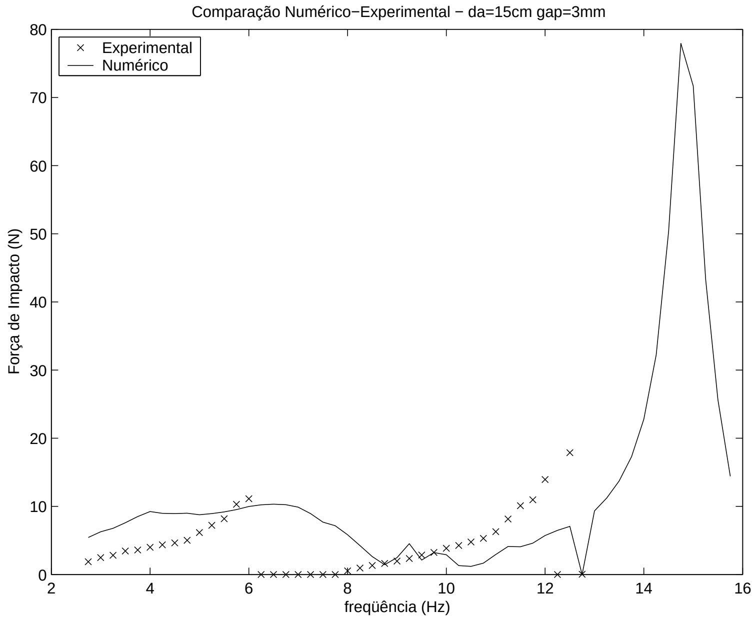


Figura 5.9: Comparação numérico-experimental; distância entre acoplamentos 15cm; gap 3mm; F_i/F_0 *versus* Ω.

A partir das figuras (5.7), (5.8) e (5.9), verifica-se que a resposta numérica, de certa forma, acompanha os dados experimentais, embora a resposta numérica aparenta estar “defasada ”do resultado experimental, isto é, os eventos (ressonâncias, por exemplo) no caso numérico ocorrem numa freqüência maior que no caso real. Para a primeira ressonância, o modelo numérico consegue reproduzir satisfatoriamente o valor máximo da força de impacto, embora com uma pequena defasagem na freqüência natural (0.25Hz). Entretanto, para o segundo modo, os resultados numéricos não reproduzem o experimento.

Os valores das freqüências e dos picos de força de impacto, tanto para o caso numérico, quanto para os resultados experimentais, são comparados na tabela (5.3). Uma outra característica que o modelo não reproduz é o salto não linear [24] da força de impacto após a ressonância, nos casos de folga não nula. Para esta situação, define-se salto não linear a queda brusca da força de impacto em freqüências logo acima da freqüência natural.

Tabela 5.3: Freqüências naturais; numérico e experimental; distância entre acoplamentos 15cm.

Freqüências naturais	**Experimental**	**Numérico**
1a ressonância, gap 0mm	7.75 Hz	8.0 Hz
2a ressonância, gap 0mm	13.25 Hz	14.8 Hz
1a ressonância, gap 1mm	6.25 Hz	7.0 Hz
2a ressonância, gap 1mm	13.50 Hz	14.5 Hz
1a ressonância, gap 3mm	6.00 Hz	6.5 Hz
2a ressonância, gap 3mm	12.50 Hz	14.8 Hz

Tabela 5.4: Forças de impacto máximas; numérico e experimental; distância entre acoplamentos 15cm.

Forças de impacto	**Experimental**	**Numérico**
1a ressonância, gap 0mm	7.25 N	8.5 N
2a ressonância, gap 0mm	18.5 N	65 N
1a ressonância, gap 1mm	9.3 N	9.2 N
2a ressonância, gap 1mm	27.0 N	70 N
1a ressonância, gap 3mm	11.1 N	10.4 N
2a ressonância, gap 3mm	18.0 N	78 N

Conforme mencionado no capítulo 4, seguindo a experiência adquirida com o experimento, recomenda-se trabalhar sempre com a primeira freqüência natural do sistema, com o intuito de gerar forças impulsivas, uma vez que, apesar de desenvolver forças de impacto menores que no segundo modo, o primeiro modo possui maior estabilidade. Com isto, o modelo numérico, embora apresente uma forte simplificação ao considerar somente 2 graus de liberdade, é satisfatório, no âmbito de aplicação ao qual estamos interessados.

5.3.2
Distância entre acoplamentos de 17cm

As comparações numérico-experimentais para a distância entre acoplamentos de 17cm são mostradas nas figuras (5.10), (5.11) e (5.12).

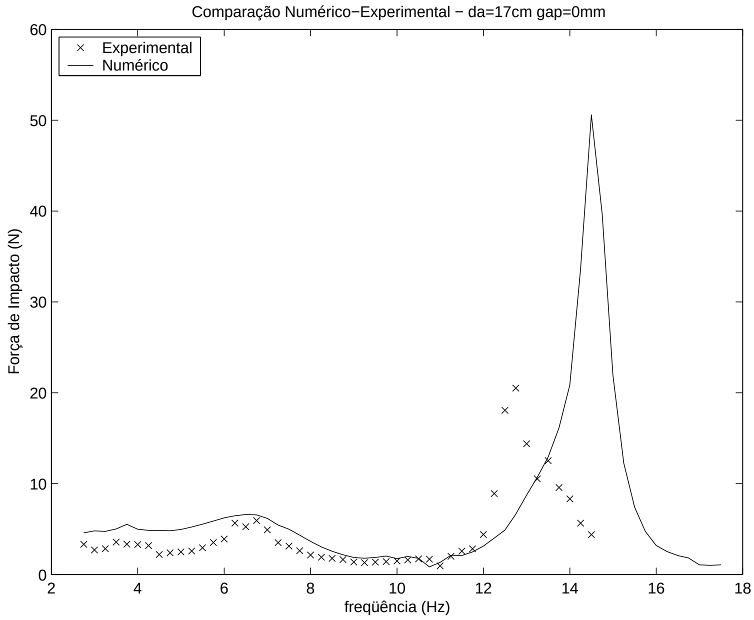


Figura 5.10: Comparação numérico-experimental; distância entre acoplamentos 17cm; gap 0mm; F_i/F_0 *versus* Ω.

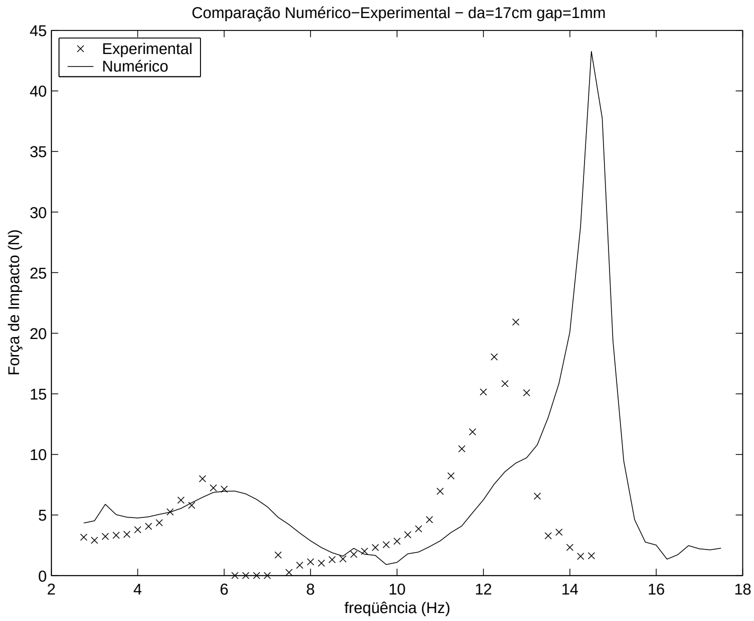


Figura 5.11: Comparação numérico-experimental; distância entre acoplamentos 17cm; gap 1mm; F_i/F_0 *versus* Ω.

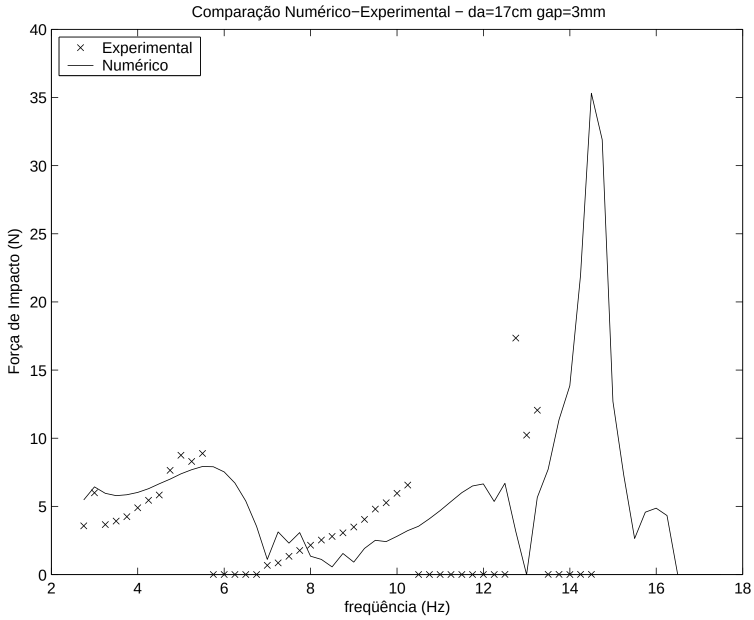


Figura 5.12: Comparação numérico-experimental; distância entre acoplamentos 17cm; gap 3mm; F_i/F_0 *versus* Ω.

Para esta distância entre acoplamentos, os mesmos comentários efetuados na análise anterior se aplicam. As tabelas comparativas do modelo numérico com os resultados experimentais, indicando as freqüências naturais e as forças de impacto, para cada folga, são apresentadas a seguir.

Tabela 5.5: Freqüências naturais; numérico e experimental; distância entre acoplamentos 17cm.

Freqüências naturais	**Experimental**	**Numérico**
1a ressonância, gap 0mm	6.75 Hz	6.5 Hz
2a ressonância, gap 0mm	12.75 Hz	14.5 Hz
1a ressonância, gap 1mm	5.5 Hz	6.2 Hz
2a ressonância, gap 1mm	12.75 Hz	14.5 Hz
1a ressonância, gap 3mm	5.5 Hz	5.7 Hz
2a ressonância, gap 3mm	12.75 Hz	14.5 Hz

Tabela 5.6: Forças de impacto máximas; numérico e experimental; distância entre acoplamentos 17cm.

Forças da impacto	**Experimental**	**Numérico**
1a ressonância, gap 0mm	6.0 N	6.6 N
2a ressonância, gap 0mm	20.5 N	51.0 N
1a ressonância, gap 1mm	8.0 N	7.0 N
2a ressonância, gap 1mm	21.0 N	43.0 N
1a ressonância, gap 3mm	8.9 N	8.0 N
2a ressonância, gap 3mm	17.5 N	36.0 N

5.3.3
Distância entre acoplamentos de 19cm

A seguir, são mostradas as comparações numérico-experimentais para a distância entre acoplamentos de 19cm.

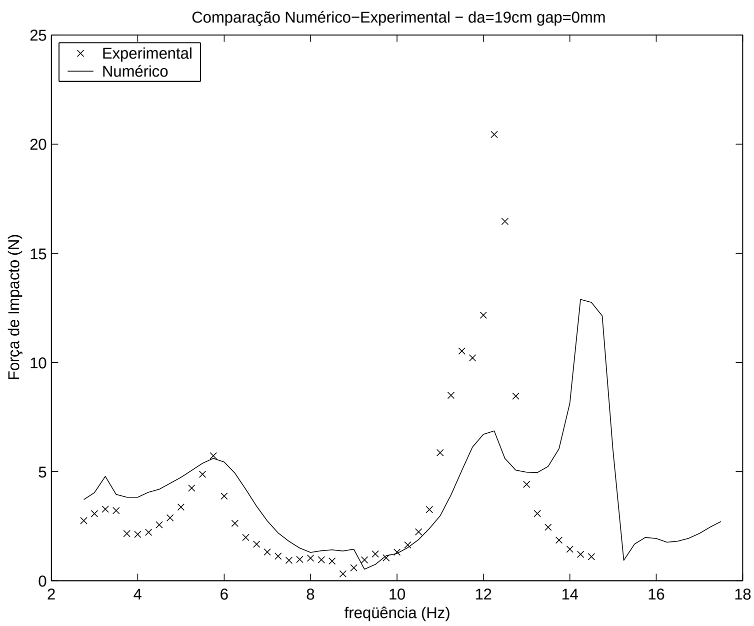


Figura 5.13: Comparação numérico-experimental; distância entre acoplamentos 19cm; gap 0mm; F_i/F_0 *versus* Ω.

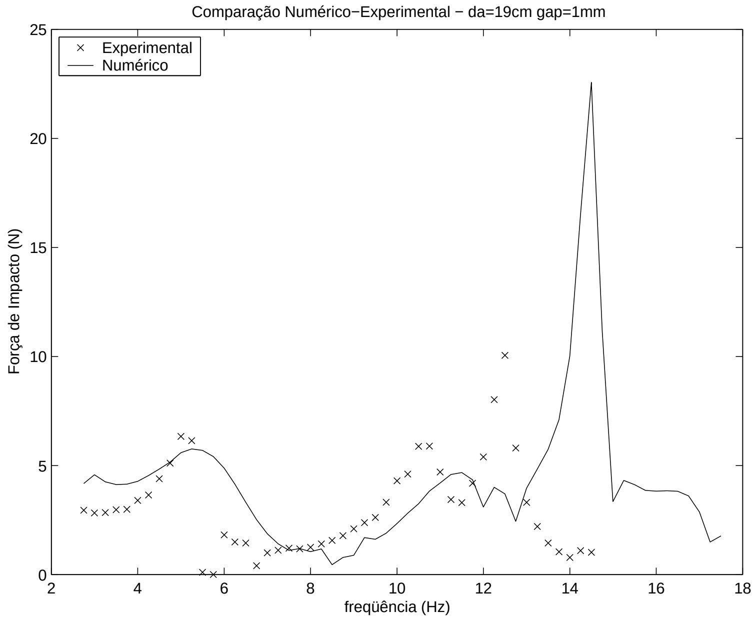


Figura 5.14: Comparação numérico-experimental; distância entre acoplamentos 19cm; gap 1mm; F_i/F_0 *versus* Ω.

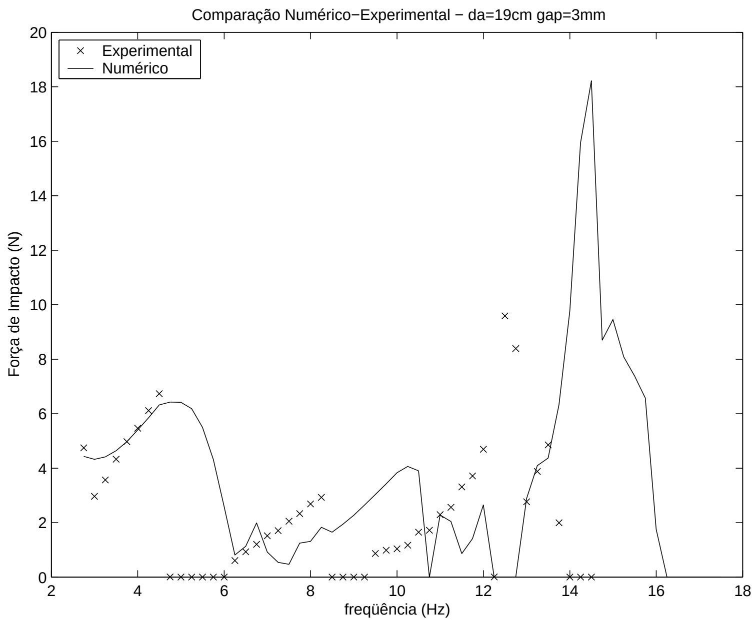


Figura 5.15: Comparação numérico-experimental; distância entre acoplamentos 19cm; gap 3mm; F_i/F_0 *versus* Ω.

Aqui, os comentários realizados anteriormente valem para esta situação. Um fato interessante a ser observado aqui diz respeito à confiabilidade do modelo. Para esta distância entre acoplamentos, não é difícil constatar que, quanto menor é a folga, maior é a proximidade dos resultados numéricos com o experimento, principalmente na região em que estamos mais interessados, isto é, em torno da primeira freqüência natural.

Tabela 5.7: Freqüências naturais; numérico e experimental; distância entre acoplamentos 19cm.

Freqüências naturais	**Experimental**	**Numérico**
1a ressonância, gap 0mm	5.75 Hz	5.75 Hz
2a ressonância, gap 0mm	12.25 Hz	14.2 Hz
1a ressonância, gap 1mm	5.00 Hz	5.2 Hz
2a ressonância, gap 1mm	12.50 Hz	14.5 Hz
1a ressonância, gap 3mm	4.50 Hz	5.0 Hz
2a ressonância, gap 3mm	12.50 Hz	14.5 Hz

Tabela 5.8: Forças de impacto máximas; numérico e experimental; distância entre acoplamentos 19cm.

Forças da impacto	**Experimental**	**Numérico**
1a ressonância, gap 0mm	5.7 N	5.6 N
2a ressonância, gap 0mm	20.5 N	13.0 N
1a ressonância, gap 1mm	6.4 N	5.8 N
2a ressonância, gap 1mm	10.0 N	23.0 N
1a ressonância, gap 3mm	6.8 N	6.4 N
2a ressonância, gap 3mm	9.6 N	18.5 N

5.3.4
Distância entre acoplamentos de 21cm

Finalmente, nas figuras (5.16), (5.17) e (5.18) são mostradas as comparações numérico-experimentais para a distância entre acoplamentos de 21cm.

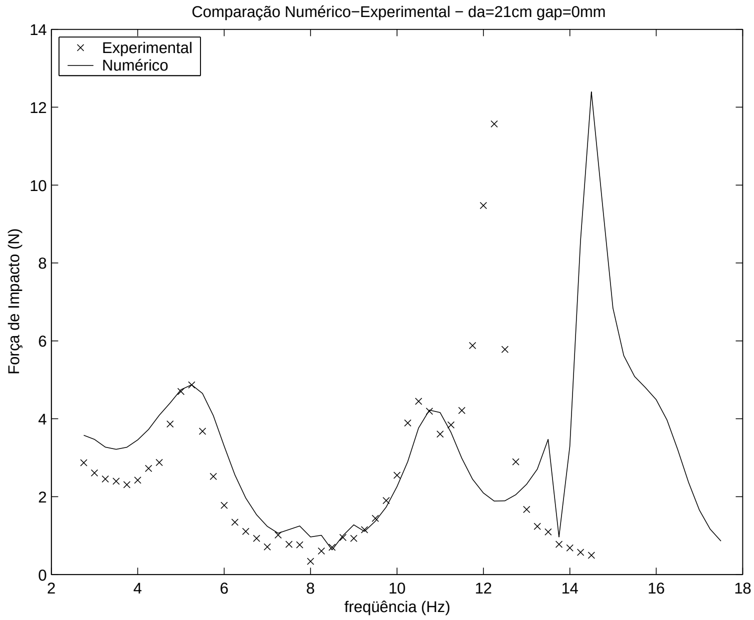


Figura 5.16: Comparação numérico-experimental; distância entre acoplamentos 21cm; gap 0mm; F_i/F_0 *versus* Ω.

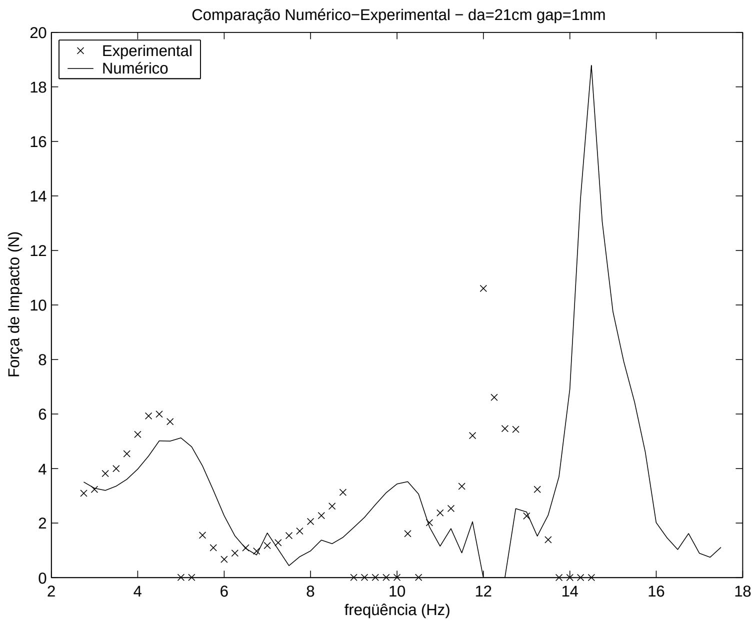


Figura 5.17: Comparação numérico-experimental; distância entre acoplamentos 21cm; gap 1mm; F_i/F_0 *versus* Ω.

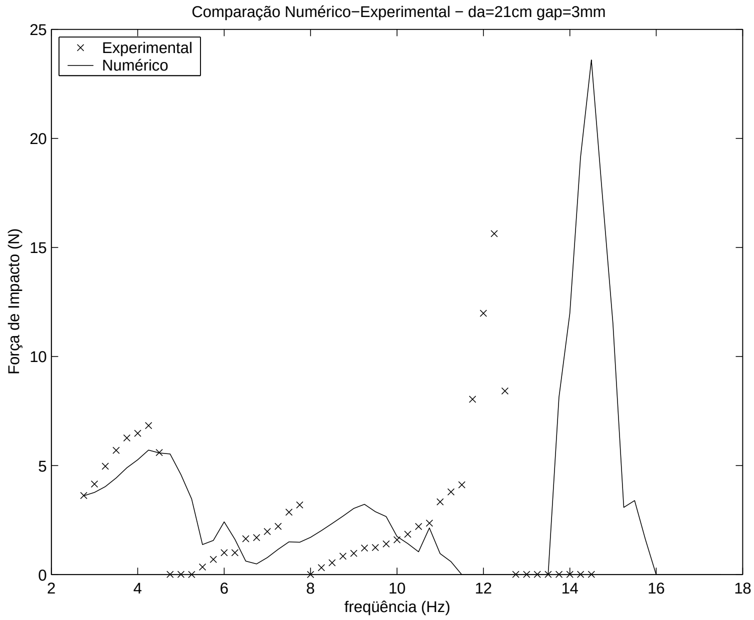


Figura 5.18: Comparação numérico-experimental; distância entre acoplamentos 21cm; gap 3mm; F_i/F_0 *versus* Ω.

Ao analisar os gráficos de uma forma global, estudando cada combinação rigidez/folga, percebemos que, quanto menor é a rigidez do RIMD, mais a resposta numérica se aproxima dos resultados experimentais. De forma similar, quanto maior é a folga, maiores são as discrepâncias entre o modelo numérico e os resultados experimentais. O gráfico da figura (5.16) mostra que, a combinação distância entre acoplamentos de 21cm e folga 0mm é onde a simulação numérica melhor se aproxima dos resultados experimentais (para a faixa de freqüência até 10 Hz), corroborando para a idéia de que o modelo torna-se mais satisfatório à medida que a rigidez do RIMD e a folga diminuem.

Tabela 5.9: Freqüências naturais; numérico e experimental; distância entre acoplamentos 21cm.

Freqüências naturais	**Experimental**	**Numérico**
1a ressonância, gap 0mm	5.25 Hz	5.25 Hz
2a ressonância, gap 0mm	12.25 Hz	14.5 Hz
1a ressonância, gap 1mm	4.5 Hz	5.0 Hz
2a ressonância, gap 1mm	12.0 Hz	14.5 Hz
1a ressonância, gap 3mm	4.25 Hz	4.5 Hz
2a ressonância, gap 3mm	12.25 Hz	14.5 Hz

Tabela 5.10: Forças de impacto máximas; numérico e experimental; distância entre acoplamentos 21cm.

Forças da impacto	**Experimental**	**Numérico**
1a ressonância, gap 0mm	4.85 N	4.85 N
2a ressonância, gap 0mm	11.6 N	12.4 N
1a ressonância, gap 1mm	6.0 N	5.2 N
2a ressonância, gap 1mm	10.6 N	18.8 N
1a ressonância, gap 3mm	6.8 N	5.8 N
2a ressonância, gap 3mm	15.7 N	23.6 N

5.4
Considerações Finais

Neste capítulo, foi realizada a comparação numérico-experimental do RIMD. Primeiramente, foram identificados os parâmetros de impacto, a partir de um experimento simples. Em seguida, foi realizada uma análise qualitativa do modelo numérico. Por fim, as simulações foram comparadas com os resultados experimentais, para validação do modelo numérico.

Durante a identificação dos parâmetros de impacto, verificou-se que, o modelo numérico consegue estimar satisfatoriamente o valor máximo da força. Entretanto, o modelo numérico apresenta dois fatores negativos. O primeiro diz respeito à energia retirada do sistema durante o processo de impacto, isto é, a área sob a curva da força de impacto no tempo. O modelo numérico utilizado não é capaz de representar o modelo experimental a partir do momento que a força de impacto passa pelo seu valor máximo.

Outro fato importante diz respeito ao intervalo entre impactos consecutivos. Em ambos os casos (condição inicial de 5 e 7mm), o impacto do caso experimental ocorreu antes do previsto pelo modelo numérico, sendo a diferença de tempo entre o instante do segundo impacto (experimental *versus* numérico) de 0.05s. Esta escala de tempo é muito maior que a duração do impacto, que é em torno de 0.002s. Portanto, a justificativa para tal fato não reside numa inconsistência do modelo da força de impacto, mas que no sistema real (sistema contínuo), após o choque, a força de impacto (impulsiva) induz vibrações em todos os modos de vibração da viga. Com isso, a energia total do sistema fica distribuída nos diversos modos de vibração, fato este não considerado no modelo numérico, que considera somente um único modo de vibração do sistema.

Analisando os gráficos qualitativamente, tendo como base os resultados experimentais encontrados no capítulo 4, verificamos que o modelo numérico é capaz de reproduzir alguns dos fenômenos encontrados experimentalmente, entre eles: as duas ressonâncias, a diferença entre as forças de impacto máximas para cada modo de vibração, a transição da primeira freqüência natural conforme a mudança da folga e a não variação da segunda freqüência natural com a folga.

Também verificou-se que a resposta numérica, de certa forma, acompanha os dados experimentais, embora os resultados numéricos aparentam estar “defasados ”dos resultados experimentais. Para a primeira ressonância, o modelo numérico consegue reproduzir satisfatoriamente o valor máximo da força de impacto. Entretanto, para o segundo modo, os resultados numéricos não reproduzem o experimento.

Uma outra característica que o modelo não reproduz é o salto não linear [24] da força de impacto após a ressonância, nos casos de folga não nula.

Conforme mencionado no capítulo 4, seguindo a experiência adquirida com a bancada, recomendou-se trabalhar sempre com a primeira freqüência natural do sistema, uma vez que, apesar de desenvolver forças impulsivas menores que no segundo modo, o primeiro modo possui maior estabilidade. Com isto, o modelo numérico, embora apresente uma forte simplificação ao considerar somente 2 graus de liberdade, é satisfatório no âmbito de aplicação ao qual estamos interessados.