

Abaixo são relacionados os sensores com a nomenclatura da Figura 4.22 e da Figura 4.23:

- Célula 01: Célula piezelétrica- mede a força de excitação aplicada pelo excitador;
- Célula 02: Célula piezelétrica- mede a força de reação entre a mesa e o amortecedor tipo Coulomb, nesta célula mede-se a força de atrito no amortecedor somada à força de inércia da parte móvel do amortecedor;
- Acelerômetro 01: Acelerômetro piezelétrico- mede a velocidade da mesa;
- Acelerômetro 02: Acelerômetro piezelétrico- mede a velocidade do ponto de fixação do amortecedor de Coulomb com o referencial inercial.
- A mesa possui uma suspensão é composta de 4 laminas de aço em paralelo com rigidez equivalente de 42210 N/m.
- A massa da mesa é de 3.3 Kg.

Para o sistema vibratório apresentado na Figura 4.21 adota-se a seguinte representação, utilizando o diagrama de blocos para sistemas MISO, da Figura 4.24 à Figura 4.25.

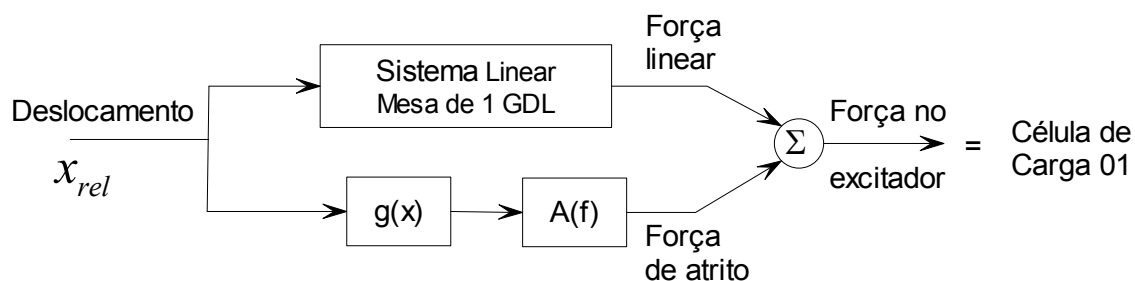


Figura 4.24 – Diagrama de blocos para o sistema da Figura 4.21.

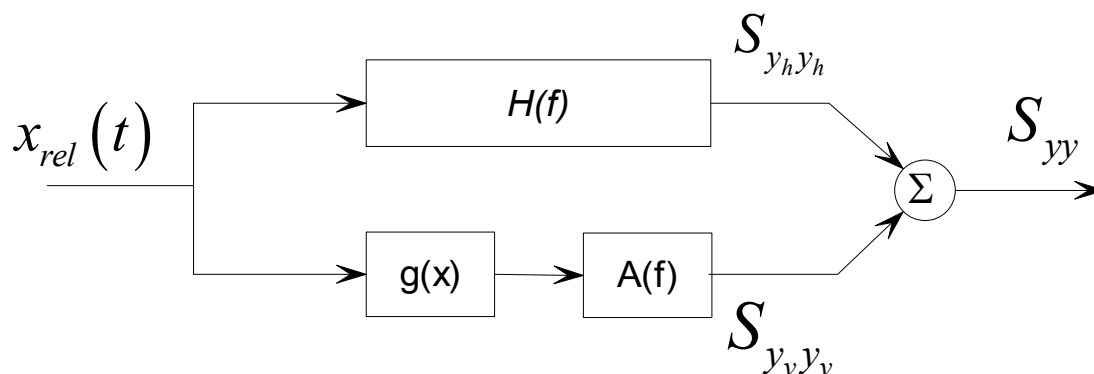


Figura 4.25 - Diagrama de blocos saídas não condicionadas.

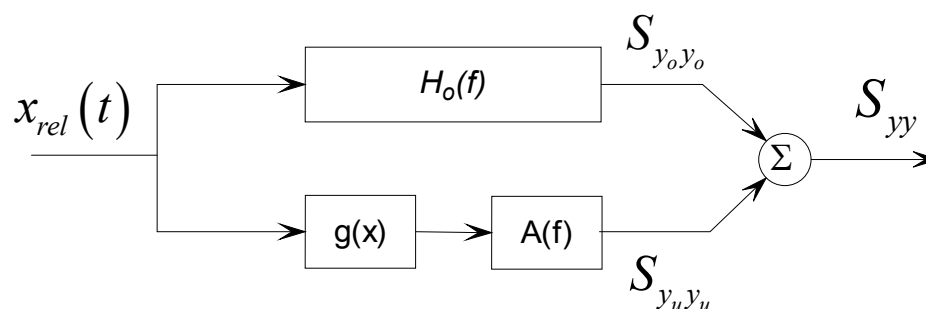


Figura 4.26 - Diagrama de blocos saídas condicionadas.

As amostras de todos os sinais foram adquiridas numa taxa de 200 leituras por segundo em blocos de dados com 4096 pontos. Para cálculo dos espectros de potência foram realizadas 40 médias. O sinal da célula 02 foi considerado como referência da força de atrito real a menos da inércia da parte móvel do dispositivo de atrito. Isto é, considerou-se que o dispositivo de atrito, superfície móvel, induzia na célula de carga 02 uma força composta de uma parcela relacionada ao atrito e outra relacionada a inércia do dispositivo. Como função não linear do atrito utilizou-se aquela apresentada na equação (4.16) por ser aquela em que os parâmetros de ajuste da função podem ser calculados utilizando somente a teoria de Hertz e a teoria de Coulomb.

Foram realizados ensaios com excitações harmônicas nas frequências 5 Hz, 10 Hz e 18 Hz e também com excitação aleatória de banda estreita com frequências entre 0 e 100 Hz.

Os ensaios com excitação harmônica na frequência de 10 Hz foram avaliados para três condições de operação do dispositivo de atrito:

- Condição A - Superfícies Limpas com acetona: condição de atrito seco entre o cobre e o aço;
- Condição B - Com óleo: condição de lubrificação com fluido viscoso;
- Condição C - Com grafite: condição de lubrificante sólido.

Para as excitações harmônicas nas frequências de 5 Hz e 18 Hz foram realizados ensaios apenas para a condição A.

Os ensaios com excitações aleatórias foram apenas realizados na condição C, onde há lubrificação com grafite. Para este tipo de excitação a condição do ensaio A não foi realizada pois o excitador não é capaz de fornecer a potência necessária para vibrar o sistema, na condição B, o sinal obtido pela célula de carga 02 foi influenciado pela inércia do dispositivo de atrito.

4.4.2 - Ensaios com excitação aleatória

Na Figura 4.27 verifica-se que, apesar da frequência natural do sistema ser 18 Hz, não ocorre ressonância, nem na curva correspondente a H_o e nem na curva correspondente a H , pois o dispositivo de atrito fornece uma força de amortecimento suficiente para tornar o sistema vibratório super amortecido.

Na Figura 4.28 são mostradas as curvas correspondentes às parcelas lineares da força total aplicada ao sistema. Denomina-se saída linear condicionada a parcela linear da saída que não possui correlação com a parcela não linear correspondente. Já para a saída linear não condicionada existe correlação com a saída não linear. Nota-se, para ambas as curvas, que a parcela linear corresponde a força de excitação imposta ao sistema. Novamente, não é possível notar a presença da ressonância devido ao amortecimento causado pelo dispositivo de atrito.

Na Figura 4.29 compara-se as saídas não lineares com a força obtida pela célula de carga 02 denominada de força de atrito*. O asterisco sobrescrito foi utilizado para indicar que apesar da força obtida pela célula de carga é próxima da força de atrito real, com um erro devido à força de inércia da parte móvel do dispositivo de atrito.

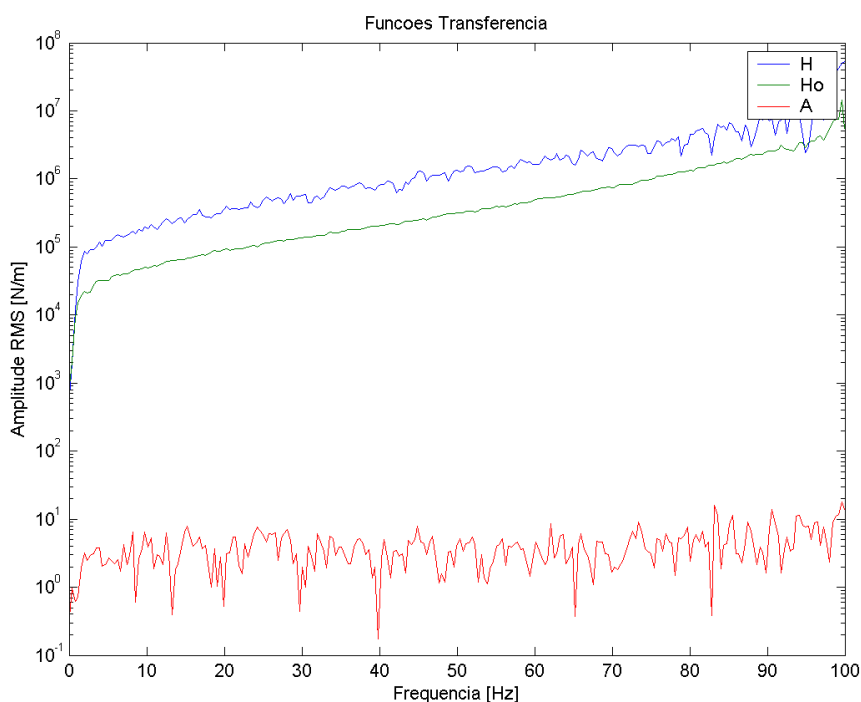


Figura 4.27 – Funções transferência para o sistema de 1 GDL nas condições do ensaio C com excitação tipo ruído de banda estreita.

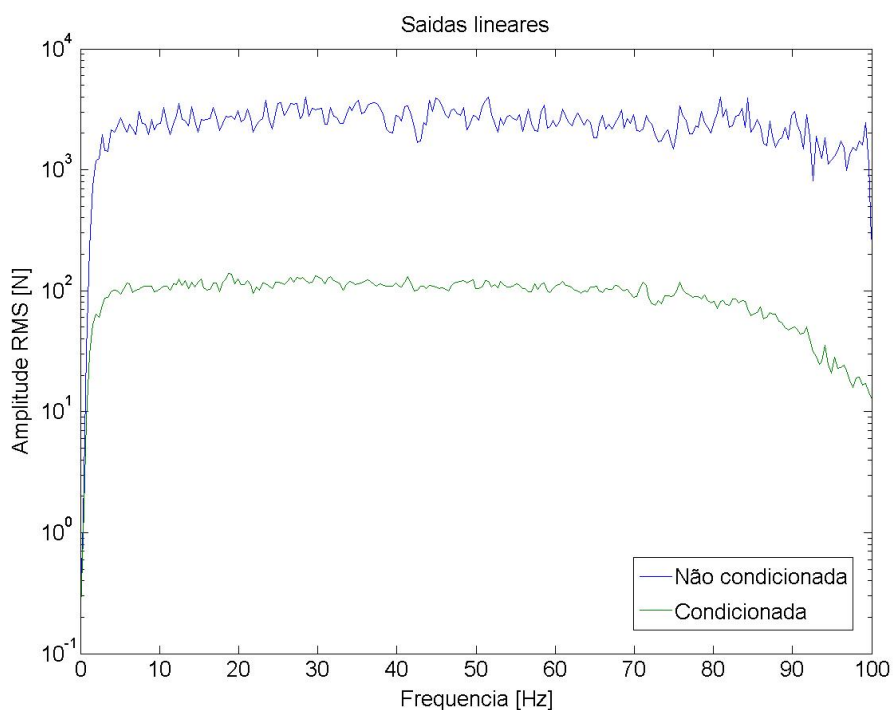


Figura 4.28 - Parcelas lineares da força para o sistema de 1 GDL nas condições do ensaio C com excitação tipo ruído de banda estreita

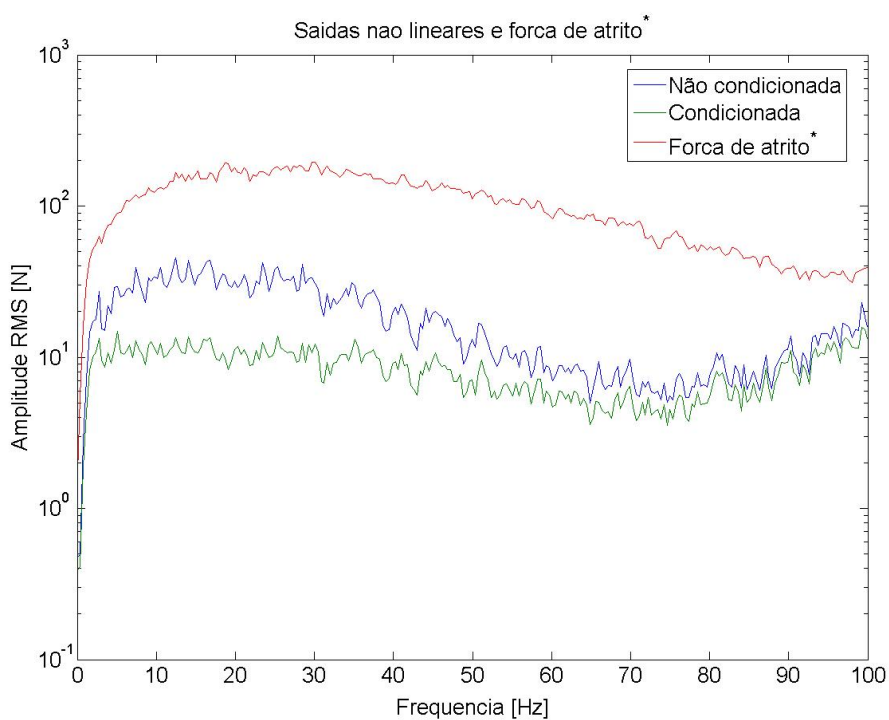


Figura 4.29 - Parcelas não lineares da força para o sistema de 1 GDL e da força obtida pela célula de carga 02 nas condições do ensaio C com excitação tipo ruído de banda estreita.

Ao se comparar a força de atrito estimada, saída não linear não condicionada, $S_{y_u y_u}$, com a força obtida pela célula de carga 02, nota-se que existe uma diferença significativa entre os valores. Tal diferença é atribuída a força de inércia do dispositivo que somente é notada pela célula de carga 02 e ao fato da resposta do sistema, deslocamento da mesa ter baixo nível, o que conduz a erros nos estimadores.

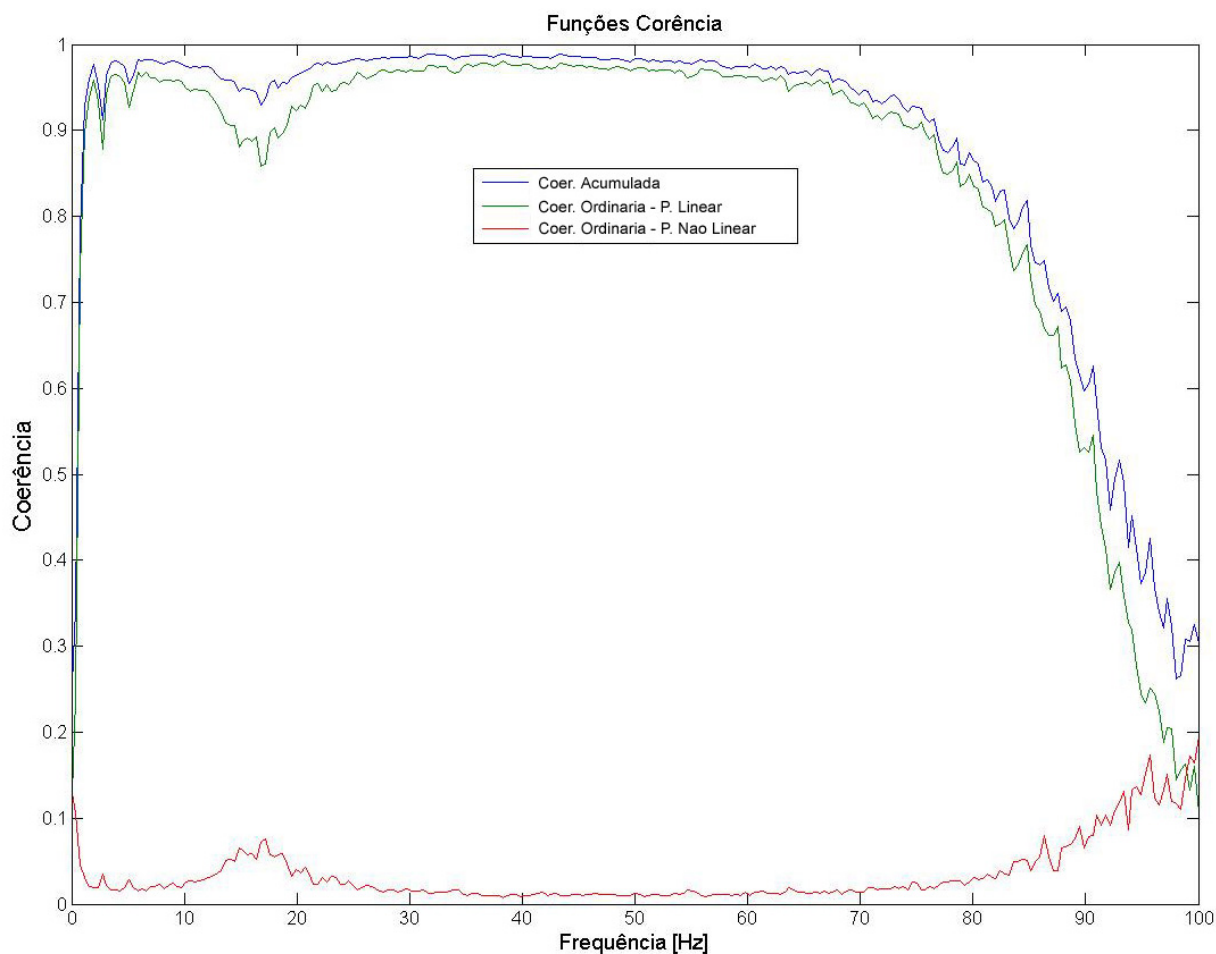


Figura 4.30 – Funções coerências entre a entrada e as saídas do sistema da Figura 4.24.

Tabela 4.3 - Erros aleatórios máximos dos estimadores para 40 médias

	$S_{y_o y_o}$	$S_{y_u y_u}$	H_o	A
Erro aleatório	17.06 %	39.35 %	4.20 %	6.78 %

Na Figura 4.30 são apresentadas as funções coerências ordinárias e a função coerência acumulada para o sistema de um grau de liberdade com amortecedor do tipo Coulomb. Deve-se notar o baixo valor da coerência ordinária para a parcela não linear da saída

condicionada quando compara a parcela linear. Tal fato resulta da participação da força de atrito na saída total ser baixa, em torno de 10% do valor da saída total. Quando compara-se a Figura 4.28 com a Figura 4.29 é notado que a parcela linear é 10 vezes maior que a parcela não linear o que resulta nos 10% indicado pela função coerência ordinária da saída não linear.

Na Tabela 4.3 são apresentados os erros aleatórios dos estimadores. O número de 40 médias foi escolhido de tal forma que o erro máximo no estimador H_o fosse inferior à 5%, condição satisfeita desde que tal erro foi de 4.20% na frequência correspondente à 18 Hz. O maior erro ocorre nesta frequência por esta ser a frequência natural do sistema de 1 grau de liberdade, portanto com baixos níveis de força de excitação. O erro de 39.35% no estimador da parcela não linear da saída condicionada deve-se à baixa contribuição desta parcela na composição da saída total do sistema.

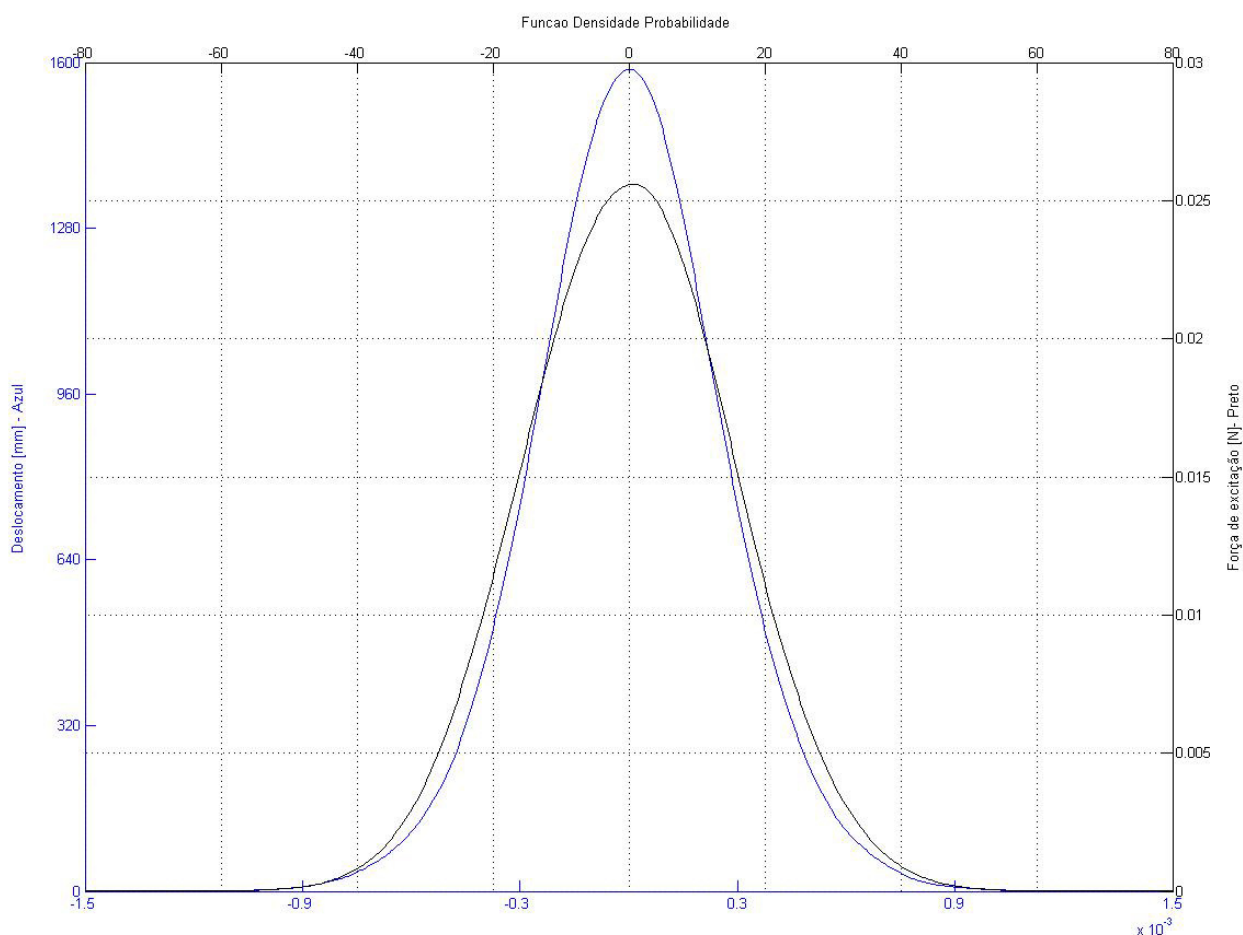


Figura 4.31 – Funções densidade probabilidade do deslocamento da mesa e da força imposta pelo excitador.

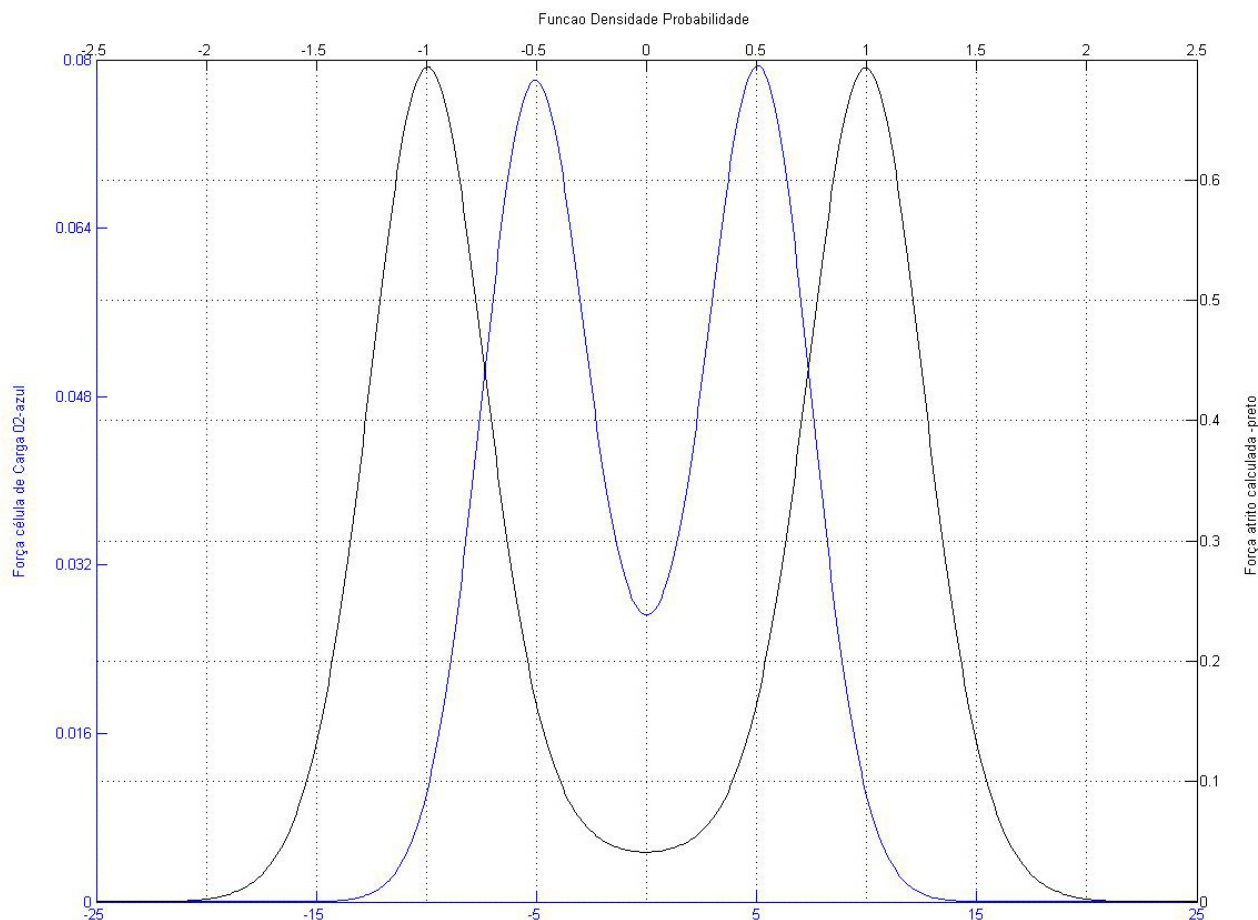


Figura 4.32 – Funções densidade probabilidade da força de atrito calculada e da força medida pela célula de carga 02.

Na Figura 4.31 são mostradas as funções densidade probabilidade para a força de excitação e o deslocamento do grau de liberdade, na Figura 4.32 são mostradas as funções densidade probabilidade para a força de atrito estimada e a força obtida pela célula de carga 02. Na Tabela 4.4 são mostrados os momentos estatísticos das grandezas físicas em estudo.

Na análise dos valores dos momentos estatísticos, da Tabela 4.4, e das funções densidade probabilidade, da Figura 4.31, pode-se verificar a presença de uma não linearidade no sistema, caracterizada pela alteração das função densidade probabilidade. Tal fato é percebido principalmente pelo valor da curtose da força de excitação que possui um valor muito próximo à 3 caracterizando uma distribuição normal. Por sua vez a função densidade probabilidade do deslocamento apresenta-se com um pico mais agudo resultando em uma curtose com valor maior que 3.

Tabela 4.4 – Momentos estatísticos para os ensaios com ruído de banda estreita.

	Deslocamento x_1	Força de Excitação	Força de atrito Estimada Normalizada	Força célula 2
Média	0.00000 [mm]	0.06867 [N]	0.00000	0.01829 [N]
D. Padrão	0.00000 [mm]	15.01 [N]	0.9756	5.255 [N]
Curtose	3.34420	2.95700	1.04140	1.45430
Assimetria	0.00470	0.01510	0.00030	0.01000

A comparação das funções densidade probabilidade da força de atrito estimada e da força medida pela célula de carga 02 mostra a influência da inércia do dispositivo de atrito. Isto é verificado pela forma da função densidade probabilidade da força de atrito estimada que se aproxima mais da função densidade probabilidade de uma onda quadrada. A curtose da força de atrito estimada quando comparada àquela da força obtida pela célula de carga 02 também evidencia a influência da inércia do dispositivo de atrito. Isto é, pela teoria de Coulomb é de se esperar que se obtenha uma onda quadrada para a força de atrito, que possui curtose igual a 1, para a força obtida pela célula de carga 02 temos uma curtose de 1.45430 evidenciando a influência da inércia do dispositivo de atrito que distorce a onda quadrada gerada pela força de atrito.

Para comprovar que a célula de carga 02 também mede a força de inércia da parte móvel do dispositivo de atrito realizou-se um ensaio com excitação tipo ruído de banda estreita até 100 Hz, na configuração mostrada na figura seguinte, onde foi mantida apenas a parte móvel do amortecedor fixada à mesa vibratória.

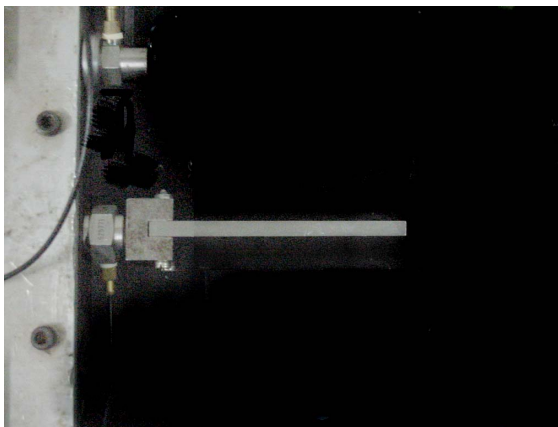


Figura 4.33 – Ensaio somente com a massa suspensa na célula de carga 02.

A partir deste ensaio calculou-se a relação entre a força medida pela célula de carga 02 e o acelerômetro 01, mostrado na Figura 4.34. Na frequência de 5 Hz, frequência em que a equação $F = ma$ é aplicada diretamente aos resultados, esta relação indica uma massa de 0.227 kg para a parte móvel do dispositivo de atrito. O mesmo dispositivo foi pesado em uma balança resultando 0.206 kg. A coerência entre os dois valores de massa do dispositivo de atrito pode ser aceita como uma prova da sensibilidade da célula de carga a força de inércia explicando o asterisco, que foi colocado, na denominação da força obtida pela célula de carga.

Deve-se salientar que a dinâmica da cadeia de instrumentação influencia de maneira significativa a obtenção da força de atrito entre duas superfícies. Mesmo com a utilização da técnica de análise não linear de sinais, a estimativa da força de atrito estará condicionada à reposta do sistema dinâmico e caso a força de atrito tenha um nível muito baixo em comparação a outros fenômenos inerentes ao sistema, sua estimativa será ruim.

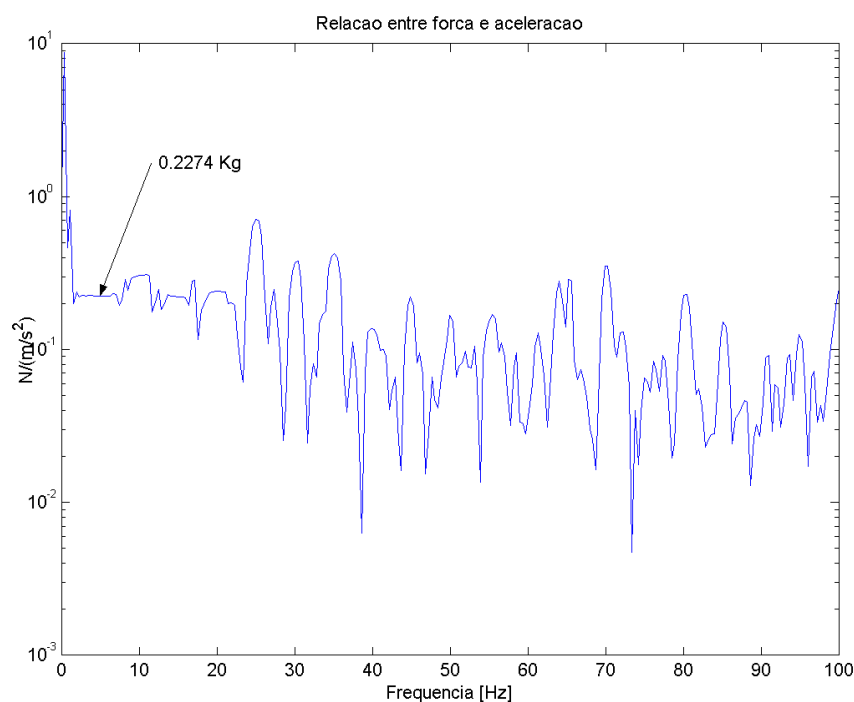


Figura 4.34 – Relação entre a força da célula de carga 02 e a aceleração obtida pelo acelerômetro 01.

4.4.3 – Ensaios com excitação harmônica

Para os ensaios com excitação harmônica de 10 Hz, da Figura 4.35 à Figura 4.37, deve-se notar que a diferença entre o valor estimado utilizando análise de sinais não linear e o valor

obtido pela célula de carga 02 é menor para o experimento na condição A. Isto é, quando a força de atrito torna-se muito maior que a força de inércia, a diferença entre o atrito estimado e o valor obtido pela célula de carga 02 diminui, pois a relação entre a força de atrito e a força de inércia do dispositivo aumenta.

Os resultados mostram que o valor estimado se aproxima muito daquele que se considera ser a referência para a força de atrito na frequência de 10 Hz, indicando que o método de análise de sinais não linear como proposto é adequado para esta aplicação. Os resultados também mostram a sensibilidade do método à variação da força de atrito desde que foi possível notar uma diferença nos valores de atrito estimado para as condições com e sem lubrificação.

As diferenças, entre o valor estimado e o valor de referência, nos valores de frequências correspondentes aos harmônicos múltiplos de 10 Hz podem ser atribuídos novamente a sensibilidade do método a baixas amplitudes de deslocamento e a força de inércia do dispositivo de atrito. Isto fica mais claro ao analisarmos a condição de ensaio B representada na Figura 4.36 onde é de se esperar, devido a lubrificação com óleo, que os harmônicos devido a força de atrito tenham amplitude muito menor que a amplitude da força de inércia.

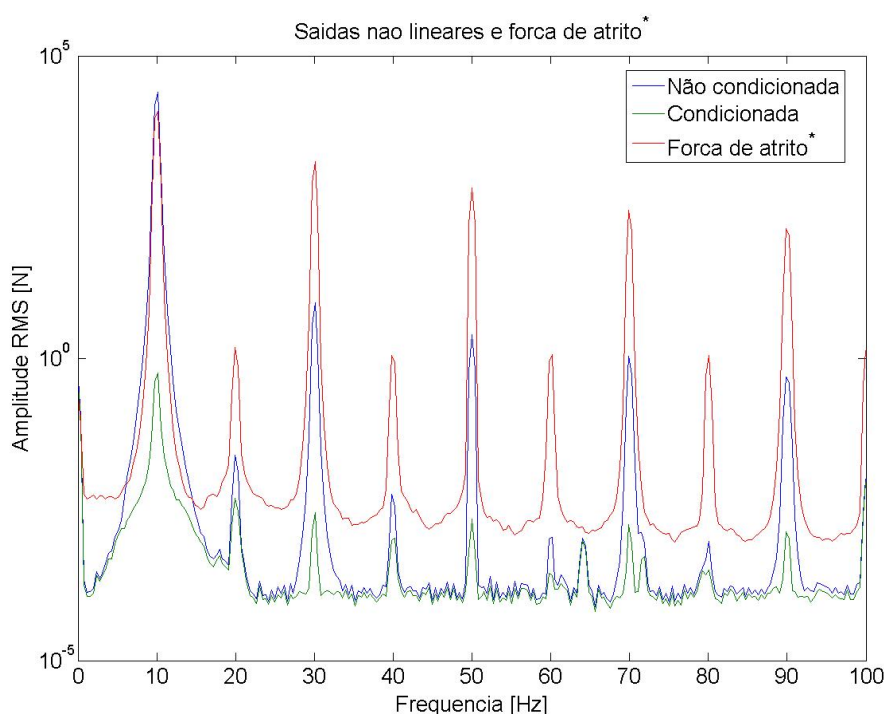


Figura 4.35 - Parcelas não lineares da força para o sistema de 1 GDL e da força obtida pela célula de carga 02 nas condições do ensaio A com excitação harmônica de 10 Hz.

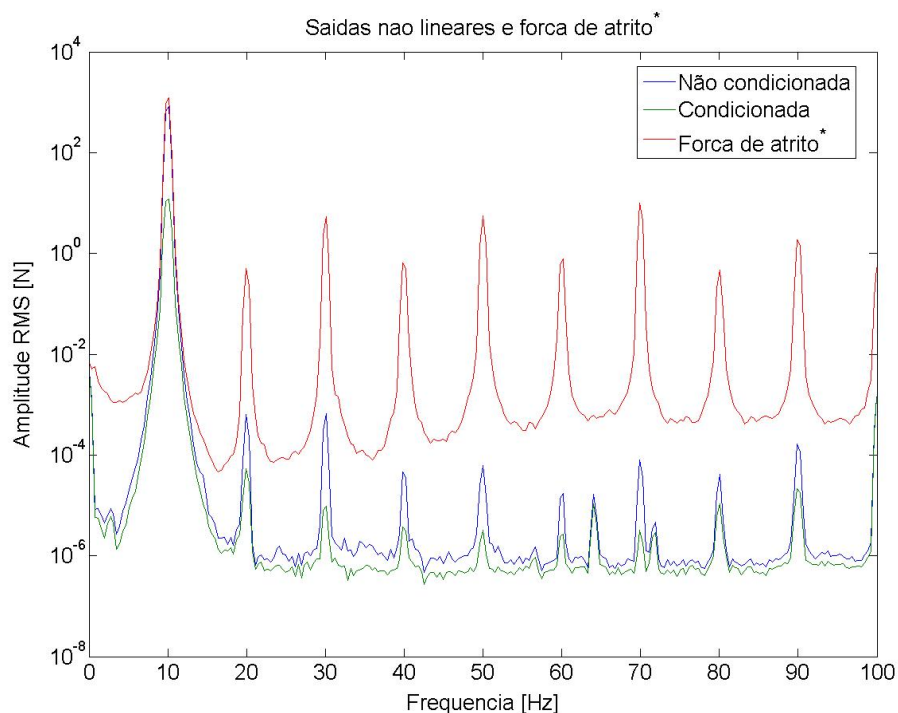


Figura 4.36 - Parcelas não lineares da força para o sistema de 1 GDL e da força obtida pela célula de carga 02 nas condições do ensaio B com excitação harmônica de 10 Hz.

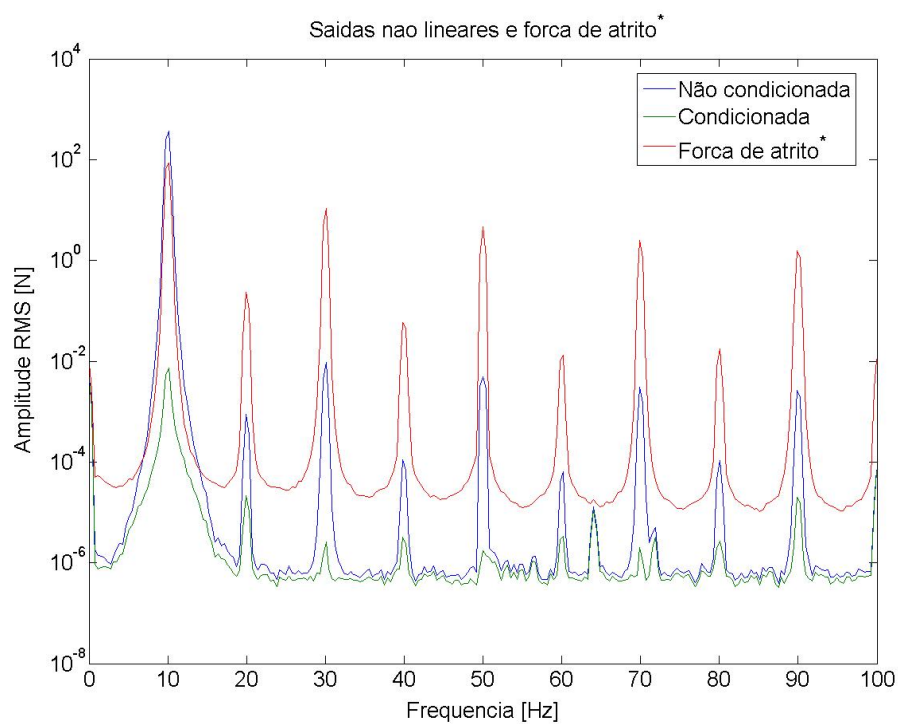


Figura 4.37 - Parcelas não lineares da força para o sistema de 1 GDL e da força obtida pela célula de carga 02 nas condições do ensaio C com excitação harmônica de 10 Hz.

A análise de sinais não linear deve ser capaz de identificar a força de atrito nestes ensaios em qualquer banda de frequência desde que para a banda de frequência desejada haja um nível de resposta provocado pela força de atrito suficiente para a aplicação do método. Para a configuração utilizada neste experimento não foi possível avaliar a performance da metodologia ao longo da frequência utilizando excitações tipo aleatórias, pois o excitador eletromagnético não é capaz de fornecer a potência necessária. Como dito anteriormente, dois ensaios foram conduzidos com forças harmônicas de frequência 5 Hz e 18 Hz. Tais ensaios foram realizados para verificar a influência da escolha da frequência para a aplicação do método, os resultados obtidos são mostrados a seguir:

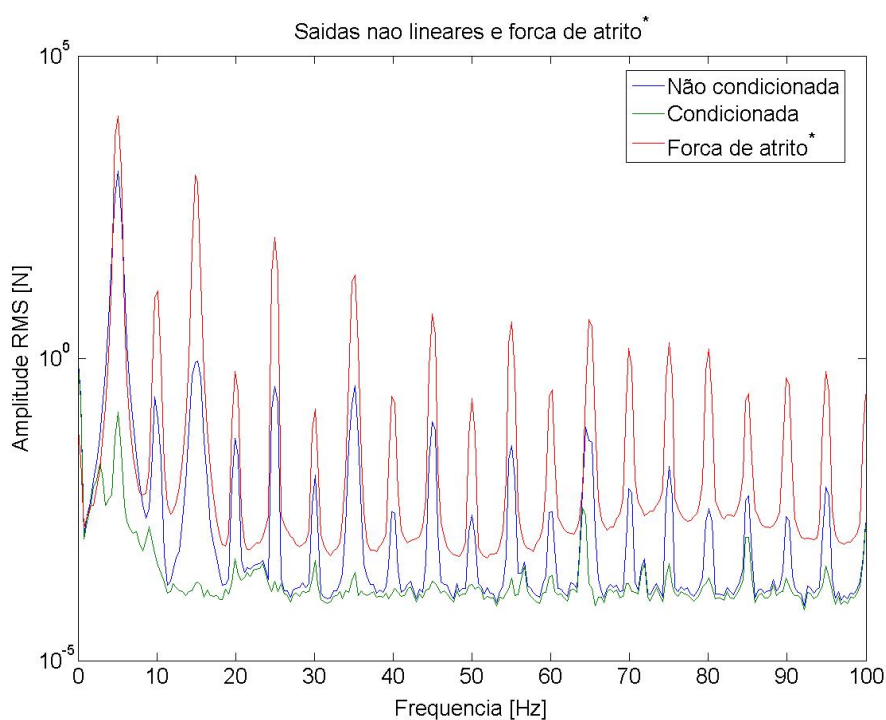


Figura 4.38 - Parcelas não lineares da força para o sistema de 1 GDL e da força obtida pela célula de carga 02 nas condições do ensaio A com excitação harmônica de 5 Hz.

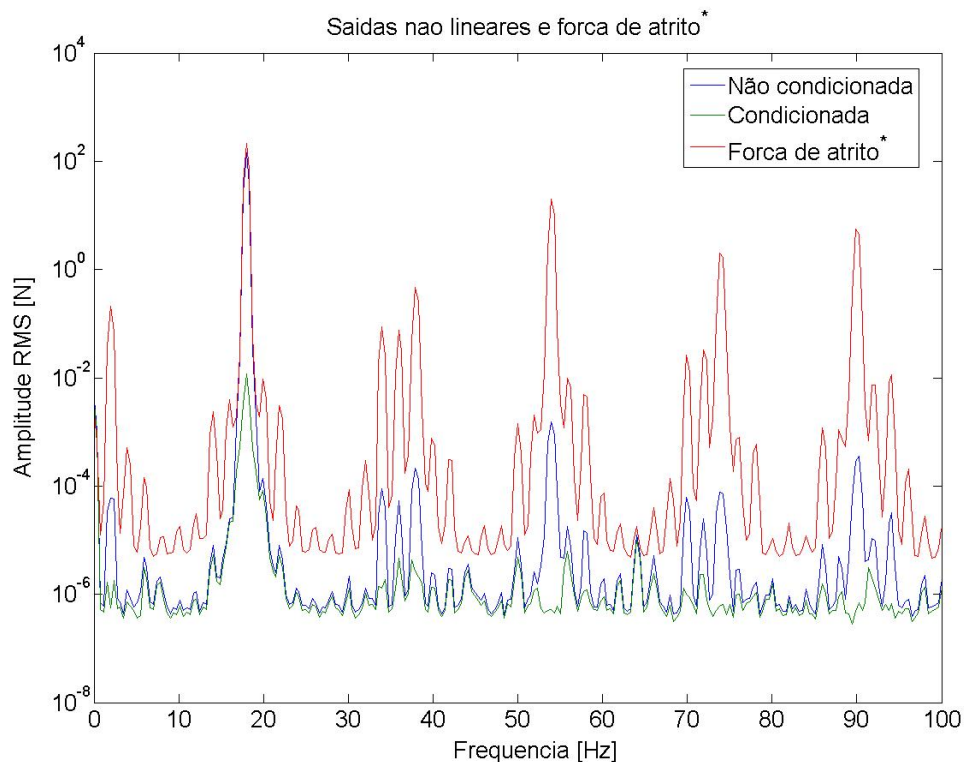


Figura 4.39 - Parcelas não lineares da força para o sistema de 1 GDL e da força obtida pela célula de carga 02 nas condições do ensaio A com excitação harmônica de 18 Hz.

Pode-se notar na Figura 4.38 e na Figura 4.39 que existe uma boa correlação entre o valor estimado e o valor de referência para a força de atrito. Esta boa correlação mostra haver interdependência entre a eficiência da metodologia proposta para identificar a força de atrito e a frequência de excitação.

Na Tabela 4.5 são mostrados os erros aleatórios dos estimadores nas frequências da excitação harmônica imposta ao sistema. Nota-se que o aumento da força de atrito, imposto pela condição de contato no amortecedor de Coulomb, reduz os erros no estimador da função autodensidade espectral relativa à saída não linear, tal fato decorre do aumento da contribuição da parcela não linear na composição da saída total do sistema melhorando a relação sinal/ruído. Deve-se notar também que a redução do erro para a parcela não linear não implica no aumento do erro relativo a parcela linear. Os erros aleatórios para os estimadores das funções de transferência, do caminho linear e do caminho não linear, são baixos para todos os experimentos, tal fato deve-se a força de excitação ser harmônica e portanto injetar energia em somente uma frequência e não sobre uma banda como ocorre para ensaios com excitações do tipo ruído branco.

Tabela 4.5 - Erros dos estimadores para ensaios com excitação harmônica

	Ensaio A Excitação 5 Hz	Ensaio A Excitação 10 Hz	Ensaio B Excitação 10 Hz	Ensaio C Excitação 10 Hz	Ensaio A Excitação 18 Hz
Erro para S_{y_o, y_o}	0.02 %	15.82 %	15.81 %	15.81 %	15.81 %
Erro para S_{y_u, y_u}	3.05 %	16.81 %	25.81 %	21.19 %	22.46 %
Erro para H_o	0.01%	1.2 %	0.04 %	0.05 %	0.09 %
Erro para A	0.02 %	0.2 %	0.04 %	0.05 %	0.06 %

Na Figura 4.40 nota-se que para valores de velocidade em módulo menores que 0.01 m/s, região em que a inércia do dispositivo de atrito influi pouco no sinal medido pela célula de carga 02, existe uma coerência muito grande entre a função não linear que representa o atrito e o sinal lido pela célula de carga 02. Para as demais regiões, velocidade em módulo superior a 0.01 m/s, ocorre um distanciamento entre as duas curvas. Tal fato deve-se a inércia do dispositivo de atrito que faz com que o sinal medido pela célula de carga 02 seja diferente da força de atrito gerada pelo amortecedor de Coulomb.

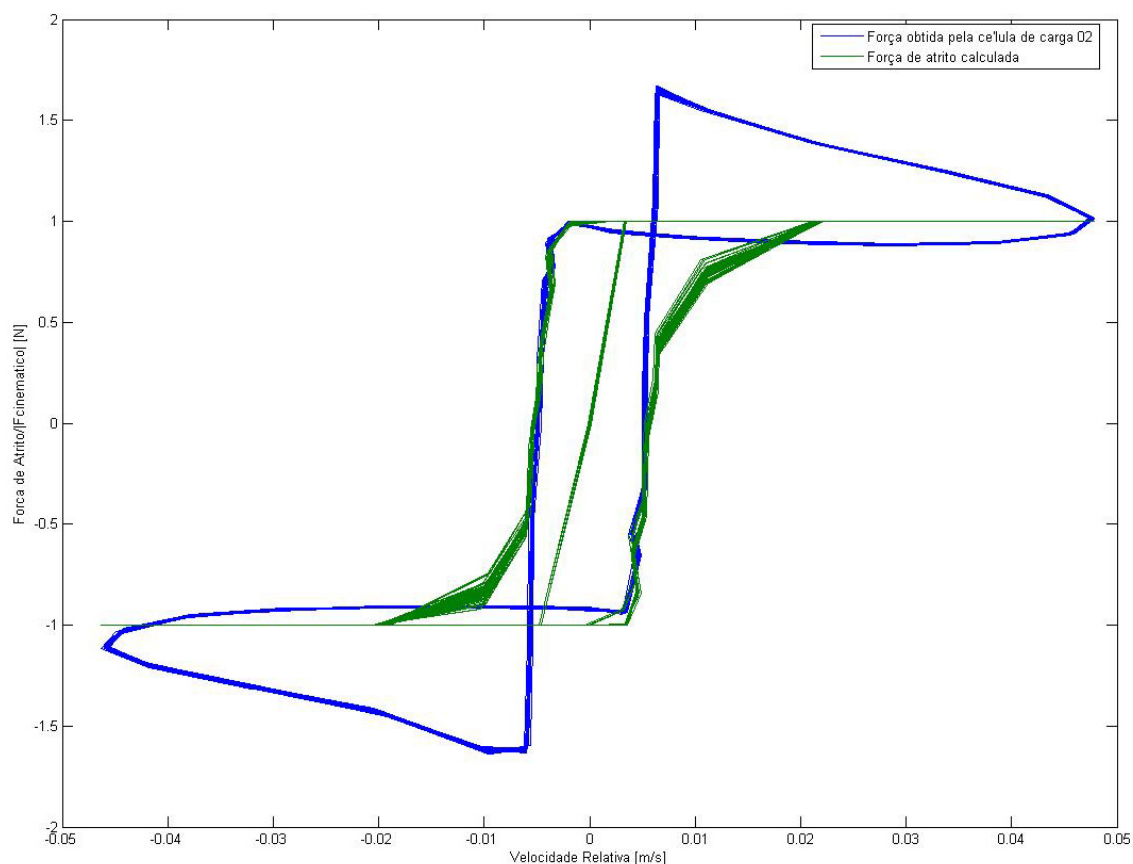


Figura 4.40 – Comparação entre a força de atrito calculada e a força obtida pela célula de carga 02 condições do ensaio A com excitação harmônica de 5 Hz.

4.5 – Conclusões

A função não linear que representa o atrito, denominada de modelo adere e desliza, foi capaz de representar o atrito inclusive para as condições em que existe a presença de lubrificantes na interface entre os patins e a haste do amortecedor de Coulomb. Tal função apresenta ainda a vantagem, sobre aquela em que se inclui efeitos de amortecimento viscoso, de ter todos os seus parâmetros calculáveis através dos conceitos desenvolvidos por Coulomb e Hertz.

O número de médias utilizadas no experimento influencia significativamente os erros aleatórios dos estimadores da parcela linear e não linear da saída. Deve-se considerar no cálculo do número de médias a natureza da força de excitação do sistema vibratório e a banda de frequência de interesse para a estimativa das forças lineares e não lineares. Tal fato deve-se a modulação pela dinâmica do sistema da excitação imposta que pode conduzir a respostas com níveis muito baixos que resultarão em erros aleatórios altos. Outro fator que deve ser sempre considerado é amplitude da força de excitação, que em bandas próximas as

freqüências naturais do sistema, assume valores muito pequenos resultando em erros aleatórios altos nos estimadores das funções de transferência. Para os casos de erros aleatórios elevados dos estimadores o número de médias deve ser elevado na razão inversa da função de coerência entre a entrada e as saídas.

A metodologia proposta mostrou-se adequada a esta classe de problemas onde têm-se interesse na obtenção da força de atrito indiretamente através da medida de outras grandezas físicas como deslocamento da estrutura e a força de reação medida entre a massa principal e um referencial inercial.

No entanto duas limitações foram notadas e devem ser consideradas em qualquer análise.

A primeira diz respeito ao nível total dos sinais de saída em relação à parcela da resposta provocada pela não linearidade a ser identificada, neste exemplo, a força de atrito. Deve-se garantir que a variável medida seja sensível ao fenômeno não linear a ser identificado.

A segunda limitação detectada é a transmissibilidade dos efeitos da não linearidade, neste caso, a força de atrito, ao longo do sistema dinâmico, incluindo a cadeia de instrumentação. Deve-se escolher o correto posicionamento do sensor e escolher a banda de freqüências da resposta que contenha maiores informações da não linearidade.

Ambas as limitações, quando não respeitadas, conduzem a erros significativos na estimativa da não linearidade, neste caso, da força de atrito.

Estas conclusões explicam o insucesso dos ensaios realizados com o tribômetro para de cilindros de laminação, inicialmente projetado e construído para avaliar o desgaste através da medição da força de atrito. Naquele equipamento os cilindros constituem massas suspensas e rotativas muito grandes apoiadas sobre células de carga destinadas a medição da força de atrito. Neste caso os efeitos do complexo comportamento dinâmico do equipamento fazem com que a força de atrito tenha um nível muito baixo em relação ao sinal total medido pelas células de carga. Adicionalmente, o sistema de acionamento dos motores elétricos, feito por um inversor de freqüências, induzia um nível alto de ruído eletromagnético, afetando significativamente a relação sinal/ruído. Conseqüentemente, nem a técnica proposta para calcular a força de atrito a partir da análise de sinais não lineares é adequada analisar o desgaste de cilindros de laminação neste tipo de tribômetro.

