

Capítulo V

Ensaio tribológico com tribômetro PLINT & PARTNERS

Neste capítulo são apresentados os experimentos e as técnicas de análise utilizadas para identificar os fenômenos tribológicos presentes em ensaios de deslizamento. Procura-se relacionar os resultados obtidos com a análise não linear de sinais com os padrões morfológicos de mecanismos de desgaste das superfícies em contato que são conhecidos e identificáveis por meio de observações das amostras em microscópio eletrônico de varredura (MEV).

A força de atrito, estimada através da análise de um sistema não linear, é comparada com imagens da superfície do desgaste, obtidas por microscopia eletrônica de varredura, evidenciando a sensibilidade da metodologia proposta aos fenômenos tribológicos relacionados a força de atrito real entre as superfícies em contato.

São discutidas as características de funcionamento do tribômetro PLINT & PARTNERS, utilizado nos ensaios de desgaste, na configuração de movimento alternativo de uma esfera sobre uma amostra plana. Inicialmente, seu comportamento dinâmico é avaliado utilizando técnicas usuais de análise de sistemas lineares.

Uma alteração na instrumentação e uma metodologia de medição são implementadas para permitir a análise do sistema não linear configurado nos ensaios tribológicos.

Para se observar fenômenos tribológicos que apresentam alterações discretas, como por exemplo uma mudança brusca no coeficiente de atrito, e também alterações gradativas do desgaste, foram escolhidas amostras com uma camada de recobrimento aplicada sobre um corpo de alumínio.

As amostras utilizadas como corpo e contra corpo são:

- Contra corpo: esférico com dureza de 848 HV, com diâmetro de 10 mm fabricados em aço AISI 52100;
- Corpo: discos com superfícies planas, fabricados em alumínio comercialmente puro com recobrimentos de Teflon e anodizados.

A escolha do material do corpo foi feita considerando sua sensibilidade aos fenômenos tribológicos que provocam considerável aumento ou diminuição da força de atrito. Isto é, para os ensaios com alumínio recoberto de Teflon espera-se a ocorrência de um aumento da força de atrito a partir da remoção da camada de Teflon. Porém, para os ensaios com alumínio anodizado deve ser produzida uma diminuição da força de atrito após a remoção da camada anodizada.

5.1 Características de funcionamento do tribômetro alternativo PLINT

O tribômetro fabricado por PLINT & PARTNERS CO UK, modelo TE67/8834 foi utilizado nos testes tribológicos e para a avaliação da metodologia proposta. Este equipamento é multifuncional sendo capaz de realizar ensaios do tipo alternativo e do tipo pino contra disco em diversas configurações,

O sistema de aplicação da carga normal entre o corpo e o contra-corpo permite o uso de peso morto ou ainda o uso de um atuador pneumático com controle de carga. Para este ultimo caso, são realizados os ensaios em que a carga normal é superior à 100 N e um sensor de deslocamento tipo LVDT pode ser usado para medir a soma dos desgastes do corpo e do contra-corpo.

No tribômetro existe a possibilidade de se aquecer o corpo até 400°C, porém o mesmo não se pode fazer com o contra-corpo.

O movimento do corpo, para ensaios do tipo alternativo, é produzido por um motor DC, conectado a um sistema biela-manivela, cuja velocidade é controlada por um sensor digital óptico incremental.

A cadeia de instrumentação embarcada ao tribômetro contém uma célula de carga piezoresistiva com capacidade de 100 N usada para medir a força de atrito aparente; um medidor do potencial elétrico do contato entre o corpo e o contra corpo na faixa de 0 à 50 mVolts DC; um termopar para controle de temperatura em ensaios a quente; um dispositivo pneumático de aplicação de carga com uma célula de carga piezoresistiva; e um medidor da soma dos desgastes do corpo e do contra corpo, do tipo LVDT.

Na Figura 5.1, é apresentado um diagrama do tribômetro e nas figuras seguintes, da Figura 5.2 até a Figura 5.4, são apresentadas fotografias do tribômetro em sua configuração para ensaios alternativos, com aplicação de carga normal através de peso morto.

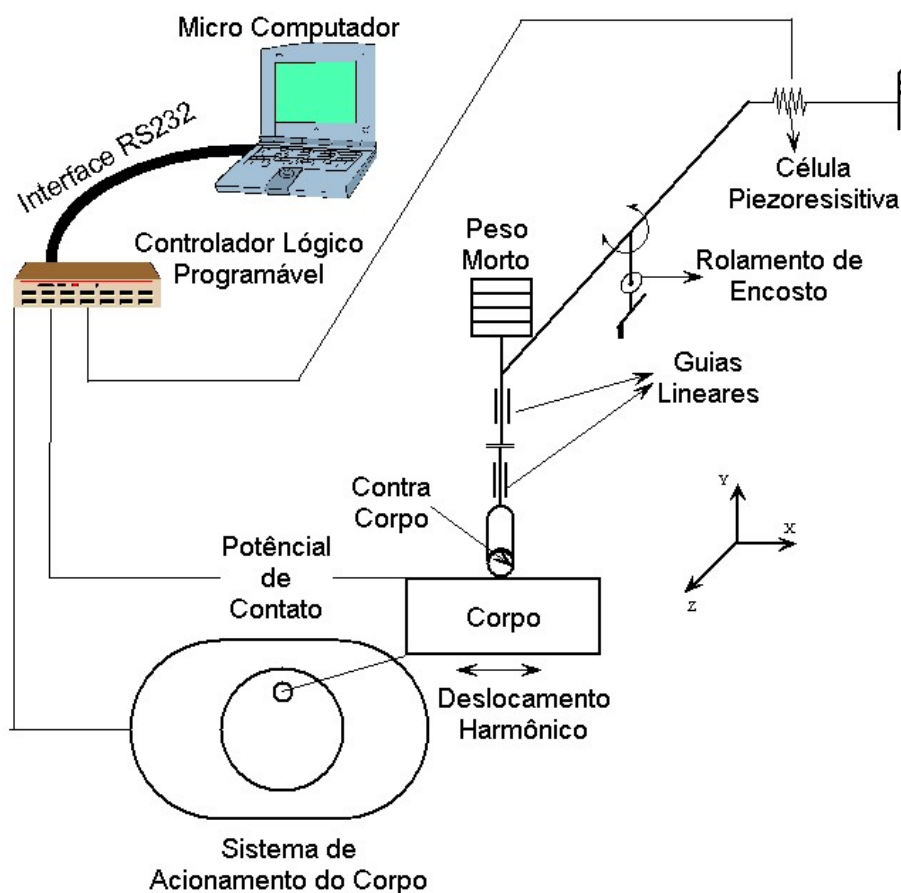


Figura 5.1 – Diagrama esquemático do tribômetro PLINT & PARTNERS e sua instrumentação embarcada para ensaios alternativos de desgaste esfera sobre plano.

O funcionamento do tribômetro PLINT & PARTNERS é realizado completamente pelo controlador lógico programável (CLP), este recebe do computador por meio da interface RS232 ajustes iniciais do ensaio como frequência do movimento harmônico, tempo de duração do ensaio e temperatura desejada para o contra corpo. Durante todo ensaio o CLP adquire as variáveis que se deseja instrumentar e as transmite via interface RS232 ao computador.

Esta característica do tribômetro PLINT & PARTNERS de ter um circuito eletrônico dedicado aos sensores já existentes não permite o seu uso direto para a aplicação da análise de sinais não lineares como proposto no capítulo anterior. Diante a necessidade de se obter a velocidade do corpo e do contra corpo, o potencial de contato e a força de atrito aparente sobre a mesma base de tempo, optou-se por obter uma derivação dos sinais dos sensores incorporados ao tribômetro PLINT & PARTNERS antes de estes serem digitalizados pelo CLP. Tais derivações foram posteriormente digitalizadas na mesma base de tempo dos sensores adicionais colocados no tribômetro PLINT & PARTNERS como será descrito posteriormente.

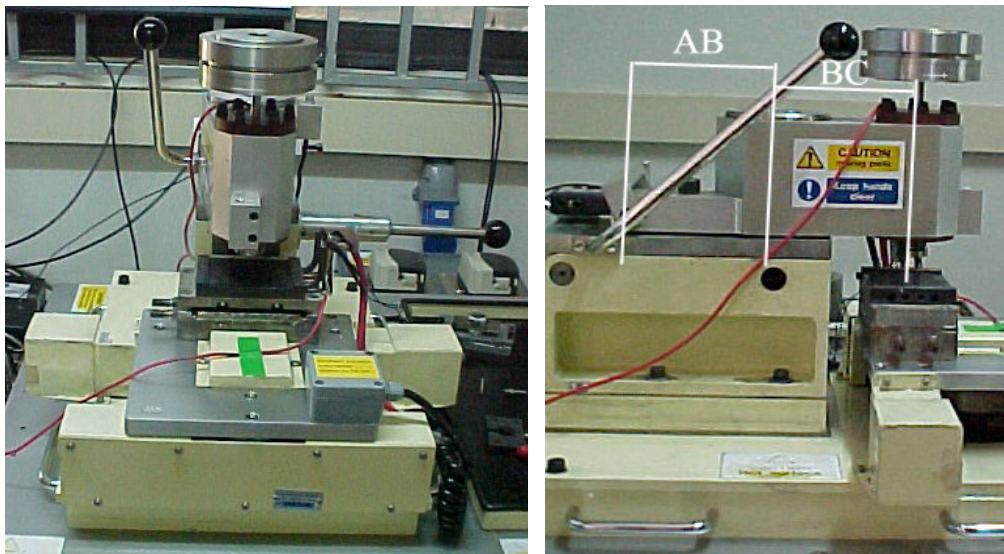


Figura 5.2 – O tribômetro PLINT & PARTNERS.

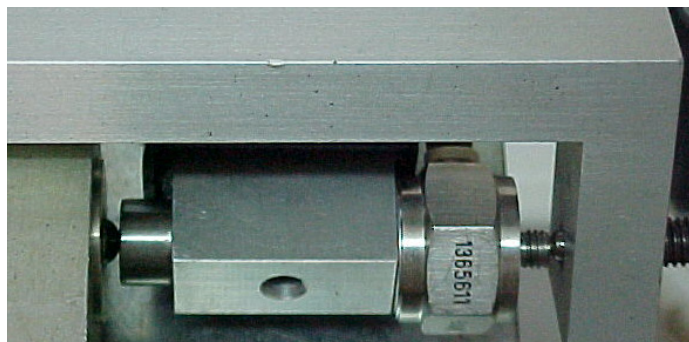


Figura 5.3 – Detalhe do tribômetro PLINT & PARTNERS, célula de carga para medir o atrito aparente.

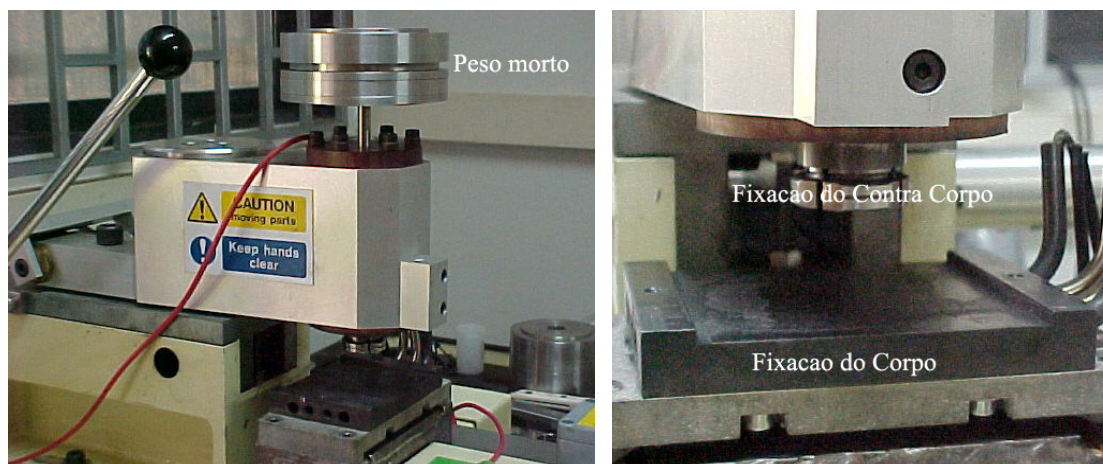


Figura 5.4 – Detalhe do tribômetro PLINT & PARTNERS, sistema de aplicação de carga por peso morto, corpo.e contra corpo.

Verifica-se no detalhe da Figura 5.2 que a distância entre o ponto de articulação do braço e o ponto de fixação da célula de carga, segmento $\overline{AB}$, e a distância do ponto de articulação ao ponto de fixação do contra corpo, segmento $\overline{BC}$, são as mesmas garantindo a razão de proporcionalidade de 1 para 1 entre uma força estática aplicada ao contra corpo e a leitura da célula de carga. A amplitude do movimento é ajustada variando-se o comprimento da biela em um mecanismo biela manivela mostrado em detalhe na Figura 5.5.

Para os casos em que se utiliza o ensaio alternativo, o sistema de aquisição e condicionamento de sinais dedicado do tribômetro permite retificar a onda correspondente a força de atrito, fazendo com que o valor lido seja sempre positivo, independente do sentido do movimento instantâneo do corpo.



Figura 5.5 – Detalhe do ajuste do comprimento da biela para fixar a amplitude do movimento alternativo.

5.1.2 Instrumentação adicional para aplicação da análise de sinais não linear na identificação da força de atrito real e ajustes da aquisição

A instrumentação original do tribômetro não permite obter os valores de deslocamento do corpo e do contra corpo que são variáveis necessárias para a utilização da análise de sinais não lineares desde que o modelo de atrito adotado é baseado no conhecimento da velocidade relativa entre o corpo e o contra-corpo. Outra limitação proveniente da instrumentação original do tribômetro é a sua banda de frequência útil que é inferior a 100 Hz.

Um acelerômetro piezelétrico foi posicionado no corpo para a obtenção de sua velocidade através de integração analógica no condicionador de sinais. A velocidade do contra corpo foi medida diretamente por um vibrômetro laser. Os valores de deslocamento do corpo e do contra corpo são obtidos por integração numérica. Tal procedimento foi adotado devido à

defasagem entre as medidas obtidas pela integração analógica no condicionador de sinais do acelerômetro e a integração numérica do sinal de velocidade obtido pelo vibrômetro laser. Uma célula de carga piezelétrica foi instalada em série com a célula de carga piezoresistiva para se obter a força de reação do tribômetro às excitações da força de atrito em bandas de frequência de até 15 KHz. Todos os condicionadores de sinais foram ajustados para filtrar o sinal em frequências superiores à 10 KHz e filtro do condicionador do vibrômetro laser que foi ajustado para o valor de 12.5 KHz. Os filtros dos demais condicionadores foram ajustados com os valores disponíveis o mais próximo possível de 10 KHz. O diagrama esquemático da instrumentação é mostrado na Figura 5.6.

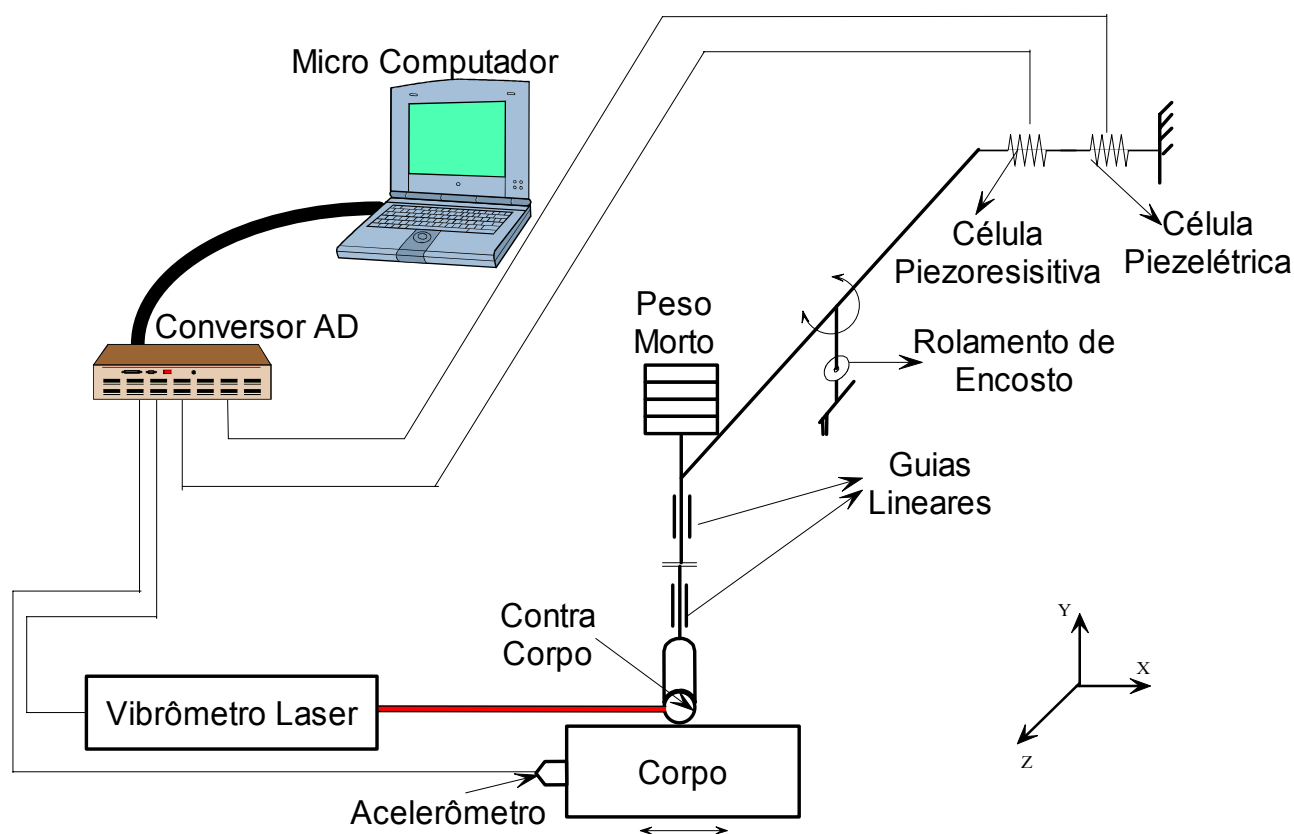


Figura 5.6 – Diagrama esquemático da instrumentação adicionada ao tribômetro PLINT & PARTNERS.

Os sinais foram adquiridos em blocos de 32768 pontos a uma taxa de aquisição de 10 kHz. O sistema de aquisição foi ajustado para adquirir 10 blocos de amostras consecutivas, que são utilizadas para compor uma média de 10 amostras dos espectros, e após esta aquisição, há um intervalo de tempo de espera de 60 segundos antes de iniciar a aquisição de 10 novos blocos de amostras.

A estratégia de aquisição foi escolhida para que o volume de dados pudesse ser armazenado em disco rígido, sem que houvesse perda de precisão na identificação de fenômenos decorrentes do desgaste dos corpos em contato. A taxa de aquisição e o número de pontos foram determinados devido à limitação de tamanho da memória de transferência da placa de aquisição, assim como à limitação do tempo necessário para escrita dos dados adquiridos no disco rígido. Na Figura 5.7 é mostrado um diagrama que representa a estratégia de aquisição ao longo do ensaio no tribômetro.

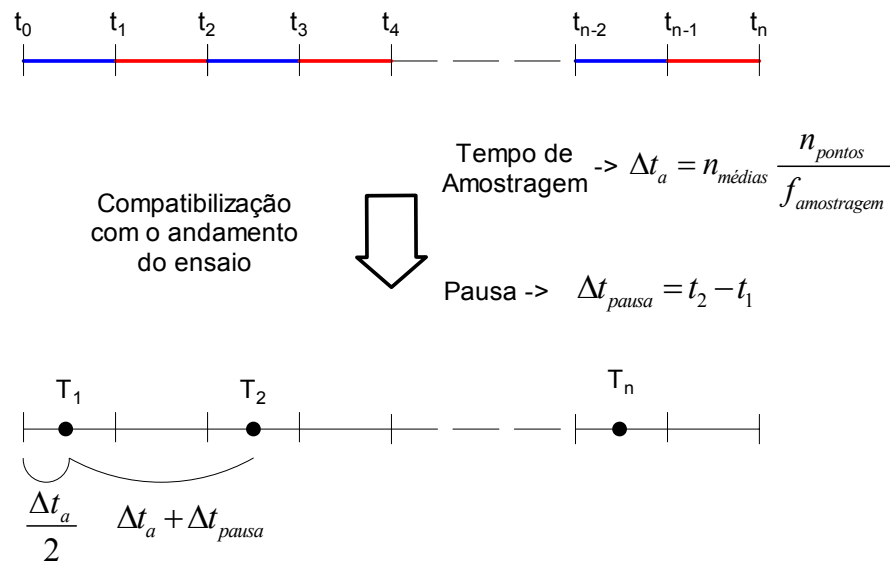


Figura 5.7 – Diagrama esquemático da estratégia de aquisição ao longo dos ensaios.

Desta forma têm-se uma resolução de tempo para a identificação dos fenômenos relacionados ao atrito igual à:

$$\Delta T_{\text{resolução}} = \left(n_{\text{médias}} * \frac{n_{\text{pontos}}}{f_{\text{amostragem}}} \right) + \Delta t_{\text{pausa}} \quad (5.1)$$

Para os ajustes escolhidos, o intervalo de aquisição dos blocos de dados corresponde a 92.77 segundos.

Deve-se salientar que há duas maneiras distintas de melhorar a resolução objetivando a identificação dos fenômenos relacionados ao desgaste dos corpos. Tais procedimentos devem considerar as limitações devidas ao tempo de transferência dos dados da placa de aquisição para o microcomputador, assim como a quantidade de memória disponível para armazenar os dados amostrados, conforme detalhado a seguir:

- Diminuição do tempo de pausa da aquisição: Tal solução tem como principal vantagem a manutenção das resoluções dos espectros calculados e do número de médias escolhidos, porém implica em uma quantidade elevada de espaço em disco rígido para armazenar os dados;
- Alteração dos ajustes de aquisição de cada amostra: Este procedimento tem como principais desvantagens a redução da resolução em frequência dos espectros e ainda aumento do erro aleatório na estimativa dos espectros devido à redução do número de médias.

Deve-se notar que para uma dada resolução de tempo para identificação de efeitos devido a mudança na força de atrito ao longo do ensaio tribológico, não é garantido que fenômenos de duração inferiores ao tempo de pausa, Δt_{pausa} , serão observados nos sinais adquiridos. No entanto, deve-se salientar que as mudanças dos aspectos macroscópicos, relacionados aos fenômenos de desgaste, são estatisticamente lentas o suficiente para que se possa ajustar uma pausa que não comprometa a avaliação e a evolução do ensaio.

Uma rotina computacional, escrita em linguagem C^{++} , foi desenvolvida para controlar a aquisição dos sinais feita por uma interface de conversão analógico-digital com taxa máxima de um milhão de leituras por segundo. Os dados armazenados em disco foram transferidos para um computador para posterior análise.

5.1.3 Comportamento dinâmico do Tribômetro PLINT & PARTNERS

Uma avaliação do comportamento dinâmico do tribômetro PLINT & PARTNERS foi inicialmente realizada para se estimar quais as bandas de frequências, com maiores ganhos, são adequadas para observar os fenômenos tribológicos decorrentes da mudança da condição do contato entre o corpo e o contra corpo.

Os ensaios para obter as funções respostas em frequência (FRF) da velocidade medida no contra corpo (ponto B) em relação à força aplicada no ponto A, localizado na extremidade da alavanca onde está fixada a célula de carga piezelétrica, foram realizados de acordo com o diagrama esquemático da Figura 5.8. A excitação utilizada é do tipo impulsiva, considerando a falta de espaço para instalar um excitador eletrodinâmico no tribômetro.

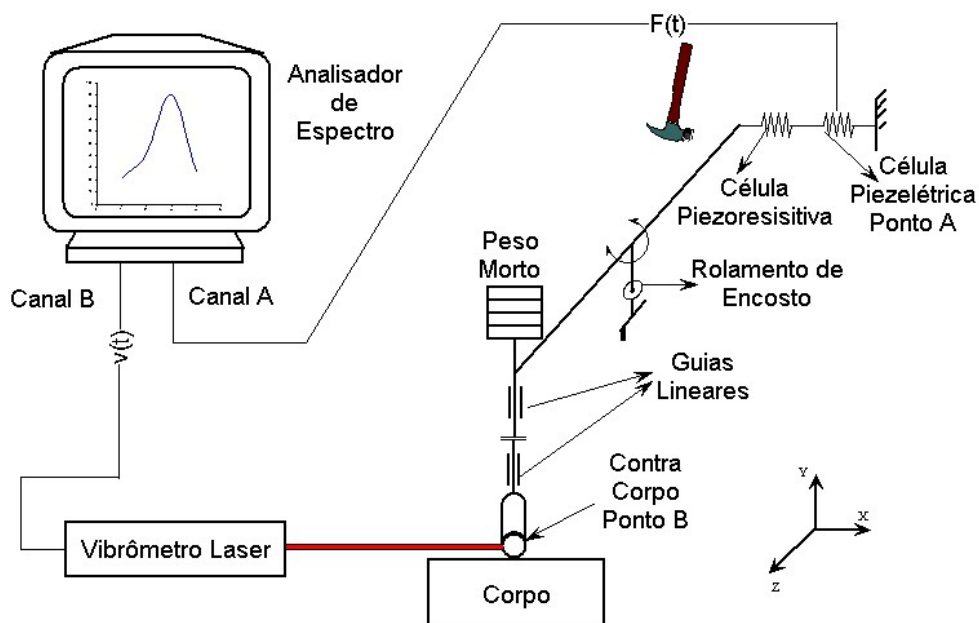


Figura 5.8 – Diagrama esquemático do experimento para obtenção das FRFs.

Os ensaios foram realizados com contato entre o corpo e contra-corpo e também na ausência de contato entre o corpo e o contra corpo. Desta forma pode-se verificar a influência do atrito sobre a função resposta em frequência. Foram também escolhidos os parâmetros força e velocidade para obtenção das FRFs desde que estes são as principais grandezas físicas relacionadas ao modelo não linear de força de atrito.

Na Figura 5.9 é apresentado o resultado do experimento sem massa do peso morto e sem atrito entre o corpo e o contra corpo. Verifica-se que a coerência assume valores maiores que 80 % nas bandas de frequência entre 100 Hz e 300 Hz, e em torno de 800 Hz e 1200 Hz. Na curva que inclui o atrito entre o corpo e o contra corpo, pode-se constatar que a coerência é maior que 80 % apenas na banda de frequências entre 150 Hz e 500 Hz, enquanto nas demais frequências seus valores são inferiores a 60 %.

Para a condição em que existe atrito entre o corpo e o contra corpo há uma redução das amplitudes e da agudeza dos picos de ressonância e dos vales de anti-ressonância da FRF. Este comportamento é atribuído à característica não conservativa da força de atrito, isto é, assim como a força de amortecimento viscoso, a força de atrito realiza trabalho retirando energia do sistema provocando a diminuição dos ganhos e da agudeza dos picos de ressonância e dos vales de anti-ressonância.

Os valores da função coerência mostram a característica não linear da força de atrito. Esta característica não linear diminui os valores de coerência principalmente pela alteração da natureza da função de densidade de probabilidade da saída em relação à da entrada. Isto é,

como os valores das FRFs foram obtidos através da análise de um modelo de sistema linear existe uma violação de um preceito da metodologia da análise de sistemas lineares, que diz que a natureza da função de densidade de probabilidade do sinal de entrada deve ser a mesma do sinal de saída. O sistema linear não pode, para um sinal de entrada com uma determinada função de densidade de probabilidade, produzir uma saída com de natureza estatística diferente.

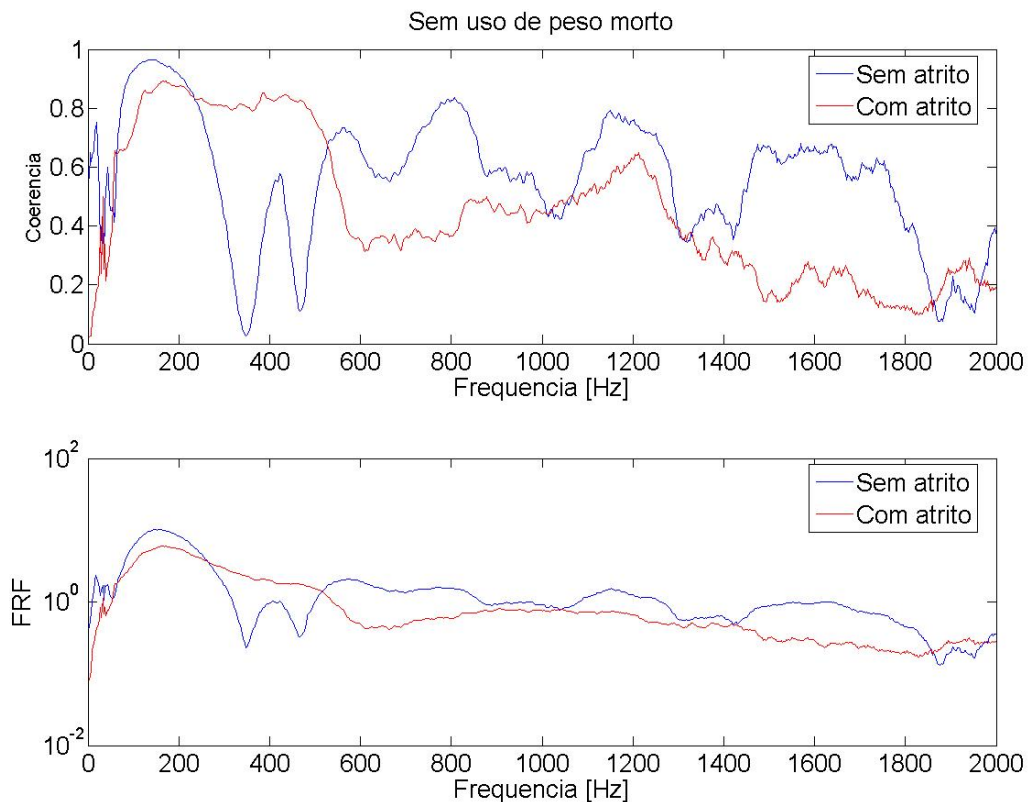


Figura 5.9 – $FRF_{BA} [m/sN]$, sem peso morto.

As figuras seguintes apresentam as funções resposta em frequência para situações de adição de massas de peso morto iguais a 4 Kg e 6 kg, com e sem atrito entre o corpo e o contra corpo. O aumento da massa do peso morto não provoca grandes alterações nas FRFs para a condição em que existe atrito, tal fato pode ser atribuído a predominância do comportamento não linear que não é representado nestas análises.

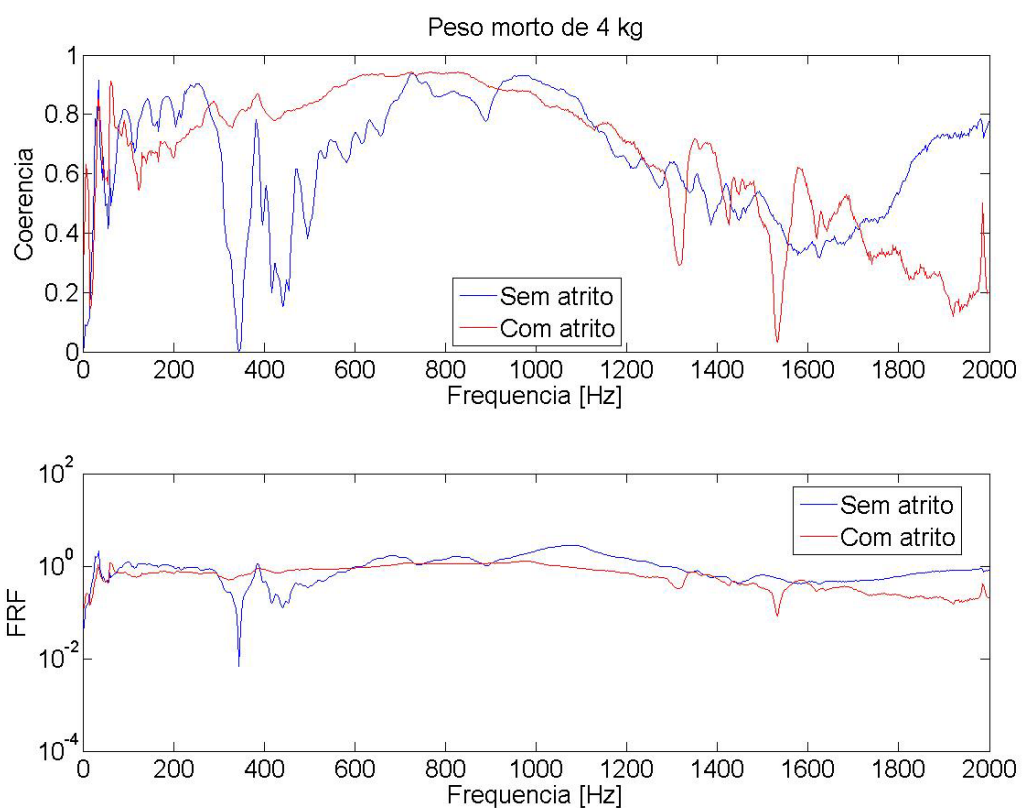


Figura 5.10 – $FRF_{BA} [m/sN]$, com peso morto igual a 4 Kg

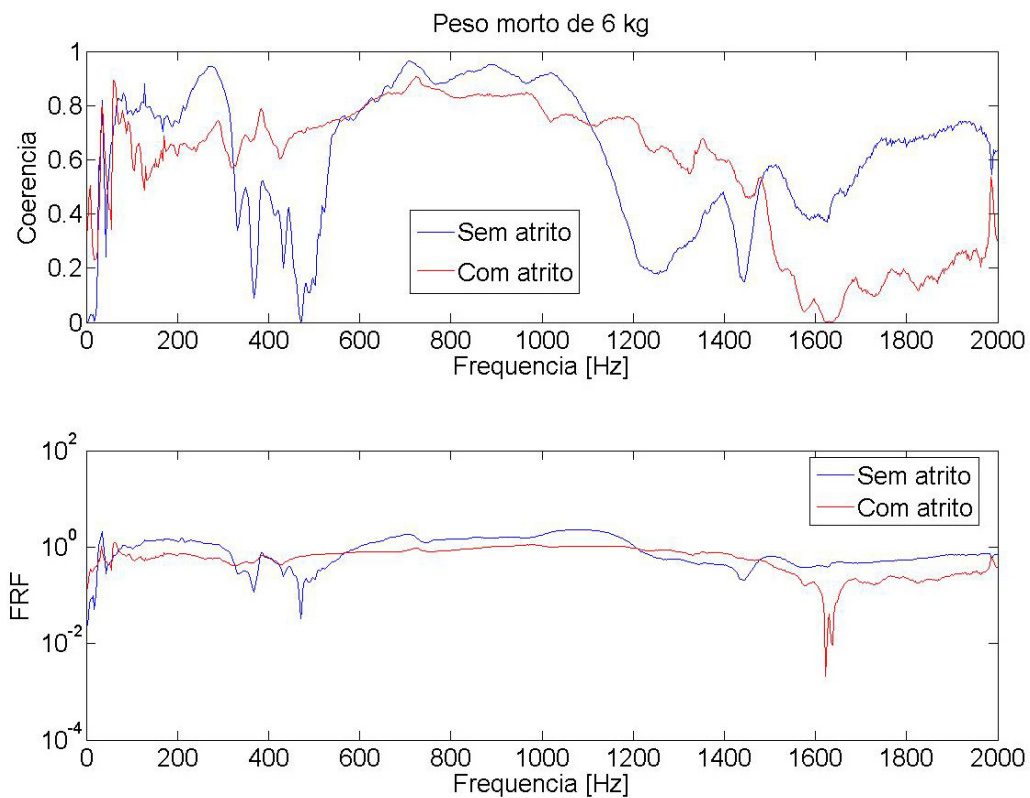


Figura 5.11 – $FRF_{BA} [m/sN]$ com peso morto igual a 6 Kg

Pode-se verificar na Figura 5.9 até a Figura 5.11 que a banda de frequência até 350 Hz apresenta maior ganho na condição em que não existe atrito. Para a condição com atrito entre o corpo e o contra corpo há uma homogeneização do ganho das FRFs até a frequência de 1600 Hz, principalmente quando existe a presença de peso morto. Tais fatos sugerem, desde que a análise de sinais lineares não é adequada quando existe atrito no sistema, que a banda de frequência até 400 Hz deve ser utilizada para a estimativa da força de atrito, isto será verificado posteriormente com a análise de sinais não lineares.

5.2 Ensaios de desgaste com alumínio anodizado

5.2.1 Ensaios preliminares

Esta classe de ensaios foi conduzida utilizando-se como corpo e contra corpo os seguintes materiais:

- Contra corpo esférico de 10 mm de diâmetro feito de aço AISI 52100;
- Corpo em forma de disco, com diâmetro de 70 mm e espessura 8 mm, com superfícies planas e paralelas, o disco é feito de alumínio com camada superficial anodizada de 0.1mm .
- Utilizou-se como frequência do movimento harmônico imposto ao corpo 2 Hz e como massa do peso morto 3 kg.

Os ensaios foram planejados para que fossem obtidas inicialmente as condições de contato entre a esfera e a camada anodizada e posteriormente a de contato entre a esfera e o alumínio. Em dois ensaios prévios para o ajuste dos ganhos dos condicionadores e do valor da carga normal verificou-se inicialmente que os ensaios poderiam ser realizados com tempo de duração diferentes para que ambas as situações tribológicas descritas fossem obtidas. Posteriormente foi verificado que, devido à heterogeneidade da espessura da camada anodizada, os ensaios deveriam ser monitorados através do potencial de contato que assume valores de 50 mVolts, desde que o óxido de alumínio não é condutor, enquanto existe integridade da camada anodizada. Estes ensaios prévios foram realizados numa amostra como mostrada no seguinte diagrama esquemático:

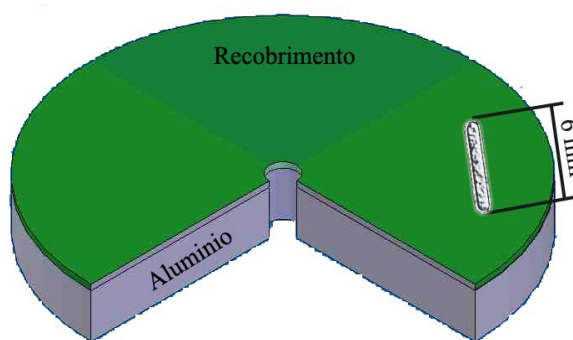


Figura 5.12 – Diagrama dos ensaios preliminares para ajustes dos sensores.

Nestes ensaios os ganhos e as bandas passantes dos filtros dos condicionadores de sinais dos sensores foram ajustados da seguinte forma:

- Vibrômetro Laser: Sensibilidade de 25 (mm/s)/V e filtro passa baixo em 12.5 kHz
- Acelerômetro: Sensibilidade de 0.316 V/(m/s) sem filtro passa baixo
- Célula de carga piezelétrica: Sensibilidade de 0.316 V/N sem filtro passa baixo
- Célula de carga piezo resistiva: Sensibilidade de 10 N/V sem filtro passa baixo
- Potencial de contato: Sensibilidade de 1 mV/V

Nos ensaios tribológicos o ajuste prévio dos ganhos deve ser sempre realizado com cuidado, pois podem ocorrer mudanças significativas no valor do coeficiente de atrito, principalmente em amostras com lubrificação, provocando grandes alterações nas amplitudes de vibração e nas forças de reação medidas na estrutura. Em alguns casos esta mudança atingiu duas ordens de grandeza, acarretando sobrecarga nos condicionadores de sinal ou nos canais de entrada da interface de aquisição. Por outro lado, a escolha de ganhos muito baixos nos condicionadores ou fundo de escala muito elevado nos canais do conversor analógico-digital não são regras gerais, pois os sinais de níveis baixos serão amostrados com maior erro.

Nestes ensaios, o modelo adotado para realizar a análise de sinais no sistema não linear utiliza a função de atrito descrita no item 4.2 e correspondente ao modelo de atrito adere – desliza. Desta forma o diagrama de blocos do sistema é representado na Figura 5.13, sendo aplicada a metodologia de análise de sinais descrita no capítulo anterior.

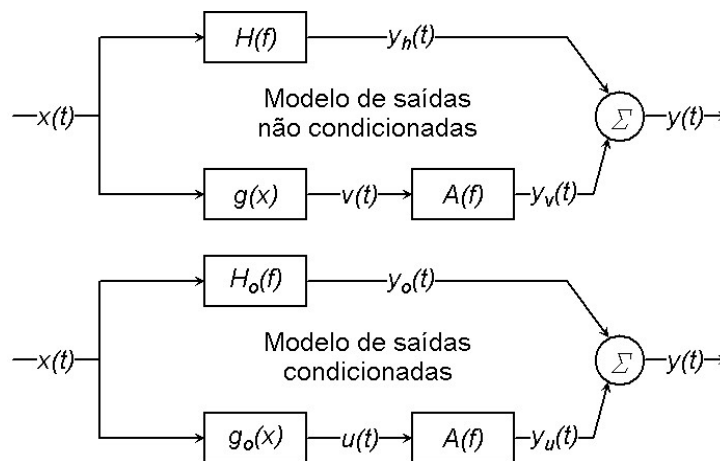


Figura 5.13– Diagrama de blocos do sistema não linear para a análise de sinais nos ensaios com o tribômetro PLINT & PARTNERS.

A correspondência entre as variáveis da análise de sinais não linear e as variáveis físicas listada a seguir é válida para todos os ensaios realizados com o tribômetro e apresentados neste capítulo.

- $x(t)$: Deslocamento absoluto do contra-corpo, obtido pela integração do sinal da velocidade medida pelo vibrômetro laser;
- $v(t)$: Força de atrito não linear sem a alteração provocada pela função transferência do caminho não linear, $A(f)$, e com correlação estatística com a parcela linear de força;
- $y_h(t)$: Parcela linear da saída com a possibilidade de existir correlação estatística entre as entradas $x(t)$ e $v(t)$;
- $u(t)$: Força de atrito não linear sem a alteração provocada pela função transferência do caminho não linear e sem correlação estatística com a parcela linear de força;
- $y_o(t)$: Parcela linear da saída sem correlação estatística entre as entradas $x(t)$ e $v(t)$;
- $y_v(t)$: Parcela não linear da saída com a possibilidade de existir correlação estatística entre as entradas $x(t)$ e $v(t)$, força de atrito estimada através da análise de sinais não linear;

- $y_u(t)$: Parcela não linear da saída sem correlação estatística entre as entradas $x(t)$ e $v(t)$, força de atrito estimada através da análise de sinais não linear sem correlação estatística dos sinais de entrada;
- $y(t)$: Saída total do sistema, sinal obtido pela célula de carga piezelétrica;
- $H(f)$: Função transferência do caminho linear com a possibilidade de existir correlação estatística entre as entradas $x(t)$ e $v(t)$;
- $H_o(f)$: Função transferência do caminho linear sem correlação estatística entre as entradas $x(t)$ e $v(t)$;
- $A(f)$: Função transferência do caminho não linear, esta não sofre alteração para os casos de haver ou não correlação entre $x(t)$ e $v(t)$;
- $g(x)$: Função não linear que representa o atrito, utiliza-se o modelo adere - desliza, com a possibilidade de existir correlação estatística entre as entradas $x(t)$ e $v(t)$;
- $g_o(x)$: Função não linear que representa o atrito, utiliza-se o modelo adere - desliza, sem correlação estatística entre as entradas $x(t)$ e $v(t)$;

A análise do resultado do ensaio utilizando as funções transferências do caminho linear e do caminho não linear permite avaliar em quais bandas de frequência o sinal contém maior energia. Isto é, através da comparação das FRFs obtidas dos ensaios com o tribômetro, mostradas no item 5.1.3, com aquelas obtidas nos ensaios de desgaste com a amostra de alumínio anodizado pode-se verificar se existe uma correspondência qualitativa do caminho linear previsto pela técnica de análise não linear com aquele obtido com a excitação impulsiva.

Deve-se notar no entanto que existem diferenças fundamentais entre as FRFs obtidas pela análise de sinais não linear, Figura 5.14, e os ensaios com excitação impulsiva. Tais diferenças são decorrentes da hipótese inicial para ambos os métodos de análise que versa sobre a natureza da FDP da entrada e da saída em sistemas lineares e não lineares, como dito anteriormente. Na formulação proposta para análise de sistemas não lineares só não existe alteração da natureza da FDP de $x(t)$ em relação a natureza da FDP de $y_h(t)$, respectivamente entrada e saída do sistema linear $H'(f)$, respeitando a hipótese inicial para sistemas lineares. Isto ocorre desde que a saída total do sistema $y(t)$ é dividida em uma parcela linear e outra não linear na formulação proposta e mostrada na Figura 5.13. Para o

ensaio com forças impulsivas temos que a natureza da FDP da entrada no sistema $H(f)$ é alterada para produzir uma nova natureza para FDP da saída desrespeitando a hipótese inicial para análise de sistemas lineares. Isto ocorre devido a resposta do sistema a uma força impulsiva ser a soma de todas as forças lineares do sistema e uma força não linear que é o atrito.

As diferenças entre as FRFs são causadas ainda pela característica das excitações em ambos os experimentos. Para o ensaio de atrito a análise de sinais não linear utiliza como entrada a variável de estado do contra corpo, deslocamento e velocidade, que é efeito das condições de contato entre o corpo e o contra corpo, portanto possui um espectro com energia somente em bandas de frequência relativas a frequência de movimento do contra corpo, seus múltiplos e em frequências decorrentes de modulações provocadas pela topografia das superfícies. Para o ensaio com força impulsiva a excitação possui uma banda de frequência mais larga excitando até 5000 Hz. Portanto as FRFs serão diferentes pois as frequências do sistema que são excitadas são diferentes.

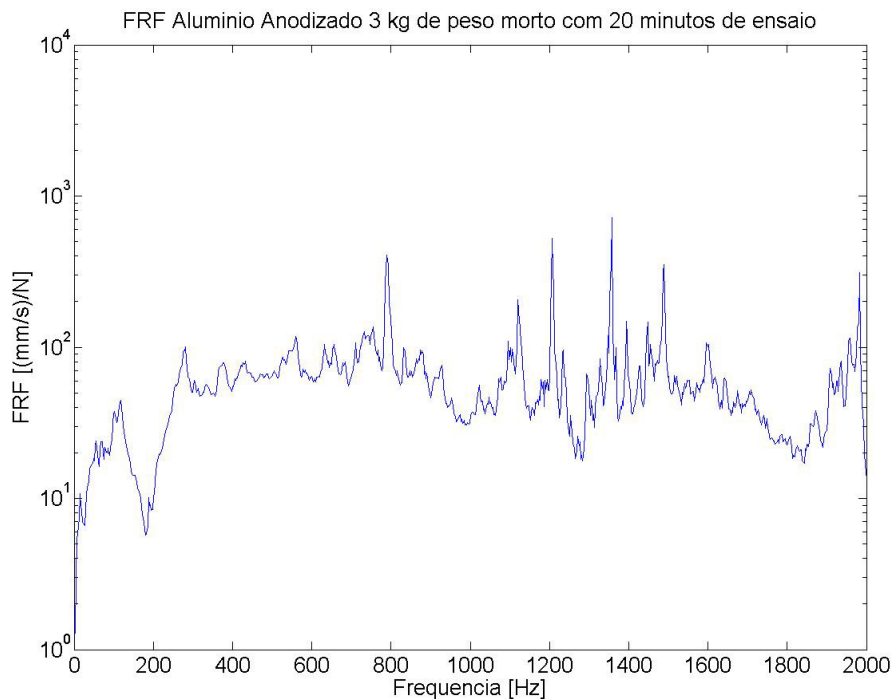


Figura 5.14 –Função resposta em frequência, H_o , do caminho linear obtida durante o ensaio de desgaste no tribômetro PLINT & PARTNERS.

Nas figuras seguintes são apresentados os valores das funções densidades espectrais para as variáveis $S_{y_v y_v}$, $S_{y_u y_u}$, $S_{y_h y_h}$ e $S_{y_o y_o}$ que são respectivamente as saídas não lineares e lineares para os sistemas MISO com e sem correlação estatística entre as entradas.

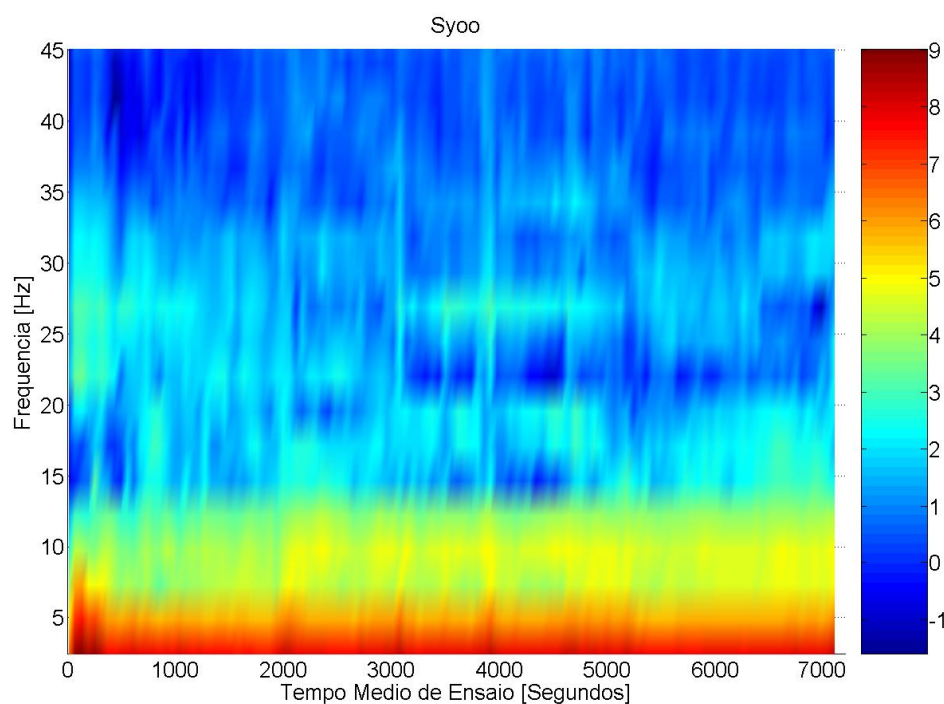


Figura 5.15– Funções auto densidade espectrais para a saída linear $S_{y_o y_o}$ do sistema MISO não linear.

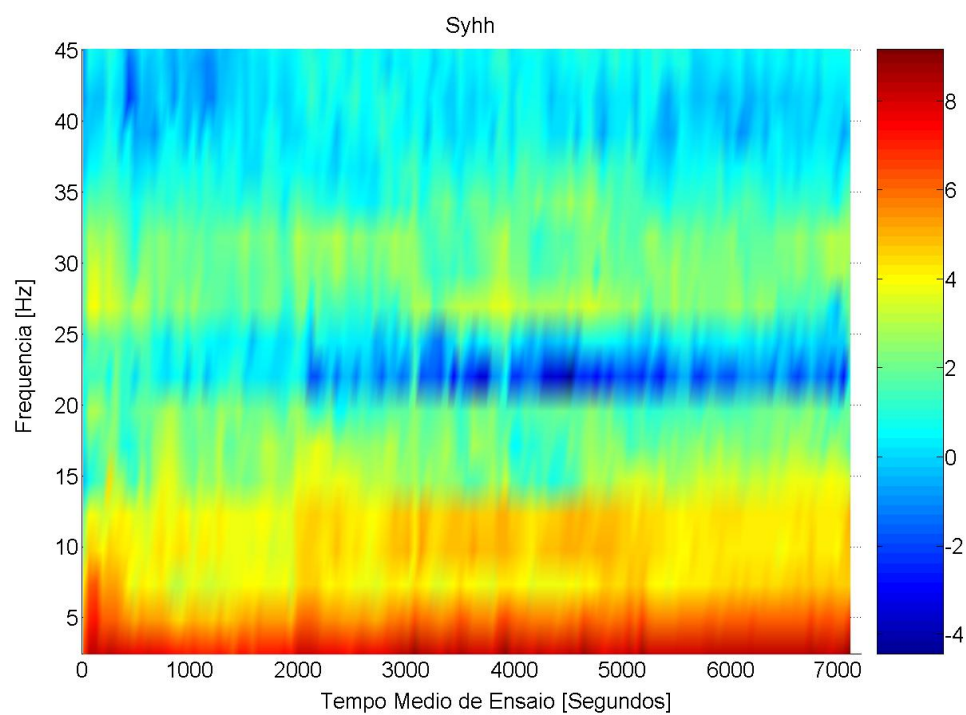


Figura 5.16 – Funções auto densidade espectrais para a saída linear $S_{y_h y_h}$ do sistema MISO não linear.

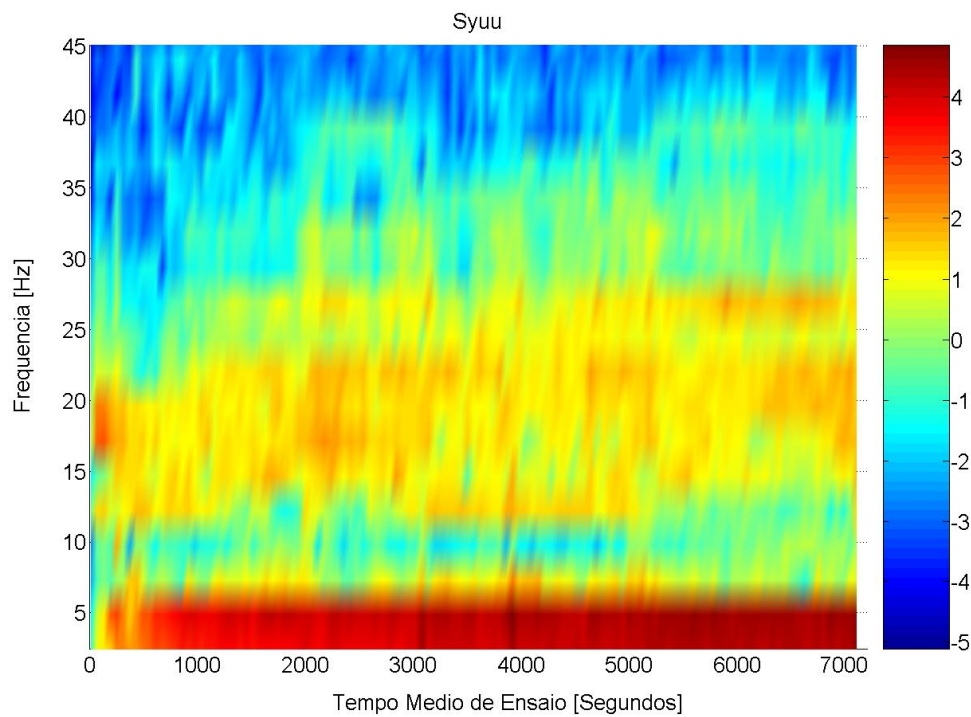


Figura 5.17– Funções auto densidade espectrais para a saídas não linear S_{y_u, y_u} do sistema MISO não linear.

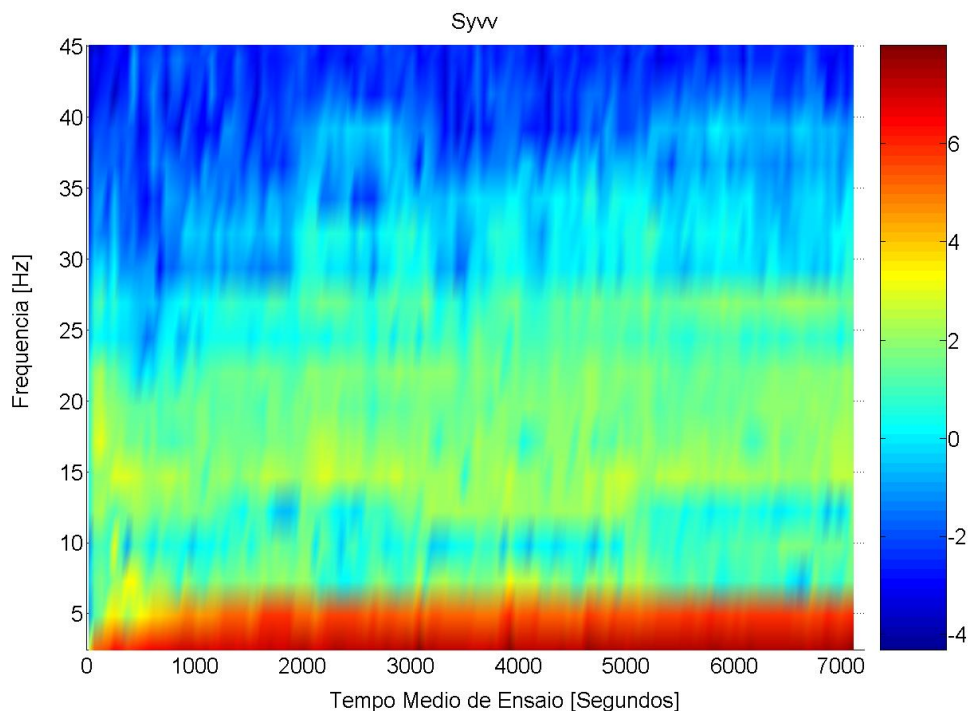


Figura 5.18 – Funções auto densidade espectrais para a saída não linear S_{y_v, y_v} do sistema MISO não linear.