

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ALEXANDRE VILMAR SECCO
JOSÉ ROBERTO KERSHAW FILHO

**CARACTERIZAÇÃO DE FERRO FUNDIDO POR MEIO DA TÉCNICA DE
EXCITAÇÃO POR IMPULSO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2014

ALEXANDRE VILMAR SECCO
JOSÉ ROBERTO KERSHAW FILHO

CARACTERIZAÇÃO DE FERRO FUNDIDO POR MEIO DA TÉCNICA DE EXCITAÇÃO POR IMPULSO

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Mecânica da Coordenação de Engenharia Mecânica – COEME – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Campus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Prof. Dr. Dalmarino Setti

Co-orientador: Prof. Dr. Paulo Rogério Novak

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a todos que contribuíram no decorrer desta jornada, em especialmente:

A Deus, pela oportunidade da vida.

Aos nossos familiares e amigos, que permaneceram ao nosso lado nos momentos difíceis, nos apoiando e incentivando.

Ao nosso orientador, Prof. Dr. Dalmarino Setti, que nos guiou durante a elaboração do trabalho, colaborando com o seu conhecimento e sabedoria.

Ao Prof. Dr. Paulo Novak, que sempre que necessário nos auxiliou, compartilhando seu conhecimento e experiência.

RESUMO

Os ferros fundidos apresentam propriedades únicas, as quais são originadas em função do formato da grafita. O conhecimento destas propriedades tem grande importância no projeto de peças e equipamentos. A caracterização das propriedades mecânicas dos ferros fundidos tem sido realizada por meio de experimentos classificados em estáticos e dinâmicos. O presente trabalho avaliou o módulo de elasticidade de diferentes tipos de ferros fundidos por meio da técnica de excitação por impulso. Esta técnica dinâmica permitiu relacionar os diferentes tipos de ferros fundidos, em função do tipo da grafita com as frequências obtidas. O procedimento experimental foi realizado com base na norma ASTM E1876-09. Foram analisados corpos de prova de aço ASTM A36, ferro fundido cinzento SAE J434 G300 e ferro fundido nodular SAE J434 D5506. Os resultados experimentais foram: Para os corpos de prova do aço ASTM A36 o módulo de elasticidade obtido foi de 204,73 GPa \pm 2 GPa, para os corpos de prova de ferro fundido nodular SAE J434 D5506 o módulo de elasticidade obtido foi de 168,53 GPa \pm 0,4 GPa e para os corpos de prova ferro fundido cinzento SAE J434 G3000 o módulo de elasticidade obtido foi de 91,56 GPa \pm 0,35 GPa. O erro da técnica de excitação por impulso não pode ser avaliado em relação ao ensaio mecânico. Os resultados experimentais obtidos apresentam concordância com os valores dos módulos de elasticidade desses materiais encontrados na literatura.

Palavras-chave: Ferro fundido, caracterização, propriedades mecânicas, módulo de elasticidade, técnica de excitação por impulso.

ABSTRACT

The cast irons have unique properties, which are generated according to the size of the graphite. The knowledge of these properties is of great importance in the design of parts and equipment. The characterization of the mechanical properties of cast irons has been performed by means of experiments classified into static and dynamic. The present study evaluated the elasticity modulus of different types of cast irons by technique of impulse excitation. This dynamic technique allowed relating the different types of irons cast, depending on the type of graphite with the frequencies obtained. The experimental procedure was carried out on the basis of the ASTM standard E1876-09. Were analyzed specimens of steel ASTM A36, gray cast iron SAE J434 G3000 and ductile cast iron SAE J434 D5506. The experimental results for the elasticity modulus obtained were: 204.73 ± 2 Gpa for the steel ASTM A36, 168.53 ± 0.4 Gpa for the ductile cast iron SAE J434 D5506 and 91.56 ± 0.35 Gpa for the gray cast iron SAE J434 G3000. The error of impulse excitation technique cannot be assessed in relation to the mechanical test. The experimental results obtained are consistent with the values of the modules of elasticity these materials found in the literature.

Keywords: Cast iron, characterization, mechanical properties, modulus of elasticity, impulse excitation technique.

LISTA DE SÍMBOLOS

E	Módulo de elasticidade de Young
m	Massa da barra de seção retangular
b	Largura da barra
L	Comprimento da barra
t	Espessura da barra
f_f	Frequência fundamental ressonante
T_1	Fator de correção do modo flexional fundamental
μ	Coefficiente de Poisson

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Curva típica tensão x deformação para três classes de ferro fundido cinzento.....	17
Figura 2 – Curva típica Tensão x Deformação para ferro fundido nodular.....	19
Figura 3 – Comparação entre a curva Tensão x deformação dos ferros fundidos nodulares e outros materiais.....	20
Figura 4 – Diferentes formas da grafita nos ferros fundidos.....	23
Figura 5 – (a) Ilustração da localização dos nós e anti-nós em vermelho para uma onda estacionária numa corda com extremidades livres. (b) Modo de vibração flexional para uma barra de seção retangular, com as linhas nodais indicadas em vermelho.	26
Figura 6 – Barra retangular excitada para captação das frequências flexionais	27
Figura 7 – Barra retangular excitada para captação das frequências flexionais	28
Figura 8 – Influência do grau de modularização em algumas propriedades para os ferros fundidos nodulares.....	30
Figura 9 – Relação entre o grau de nodularização e o módulo da elasticidade	31
Figura 10 - Curva típica tensão x deformação para aços estruturais.	32
Figura 11 - Curva tensão x deformação parcial na região elástica para aços estruturais.	32
Figura 12 – Esquema do aparato utilizado no procedimento experimental.....	37
Figura 13 - Barra retangular excitada para captação das frequências flexionais	40
Figura 14 – Ilustração do corpo de prova utilizado no ensaio de tração	42
Figura 15 – Ilustração dos corpos de prova com sua designação.....	45
Figura 16 – Sistema bi apoiado confeccionado para o ensaio	46
Figura 17– Ilustração do posicionamento do acelerômetro e elásticos sobre o corpo de prova.	46
Figura 18 – Fator de amortecimento para o corpo de nodular com apoios.....	47
Figura 19 – Fator de amortecimento para o corpo de nodular livre-livre.	47
Figura 20 - Corpo de prova bi apoiado.....	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química; (SAE J431 Grade G3000 ou equivalente ASTM Classe 30)	16
Tabela 2 - Módulo de elasticidade típico para barras de ferro fundido cinzento.	18
Tabela 3 - Composição química SAE D5506	19
Tabela 4 - Módulo de elasticidade para diferentes classes de ferro fundido nodular.	20
Tabela 5 - Comparativa dos métodos em função de diversos fatores.....	35
Tabela 6 - Amostras descritas em função de seu tamanho	36
Tabela 7 – Composição química do Ferro Fundido nodular J434 D5506.	37
Tabela 8 - Dimensões dos corpos de prova utilizados nos ensaios de tração	42
Tabela 8 – Identificação dos corpos de prova	44
Tabela 9 – Resultados do ensaio dinâmico bi apoiado.	49

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Comparativo entre os valores do módulo de elasticidade do ASTM A36 obtido no ensaio dinâmico com os valores indicados no referencial teórico.	49
Gráfico 2 – Comparativo entre os valores do módulo de elasticidade do Nodular SAE - D5506 obtido no ensaio dinâmico com os valores indicados no referencial teórico.	50
Gráfico 3 – Comparativo entre os valores do módulo de elasticidade do Cinzento SAE – G3000 obtido no ensaio dinâmico com os valores indicados no referencial teórico.	51

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
1.1 Objetivos.....	13
1.1.1 Objetivo Geral.....	13
1.1.2 Objetivos Específicos.....	13
1.2 Justificativa	14
2 REVISÃO DE LITERATURA	15
2.1 Tipos de ferros fundidos	15
2.1.1 Ferro fundido cinzento	15
2.1.1.1 Propriedades do Ferro fundido cinzento – Composição.	16
2.1.1.2 Propriedades do ferro fundido cinzento – módulo de elasticidade.....	16
2.1.2 Ferro fundido nodular.....	18
2.1.2.1 Propriedades do Ferro fundido nodular – Módulo de elasticidade.....	19
2.1.2.2 Coeficiente de Poisson	21
2.1.2.3 Limite de proporcionalidade.....	21
2.1.2.4 Limite de Resistência.....	21
2.1.2.5 Resistência a tração	22
2.1.3 Ferro fundido de grafita compactada	22
2.2 Fatores que afetam a grafita nos ferros fundidos	22
2.2.1 Composição química	23
2.2.2 Velocidade de resfriamento	24
2.2.3 Inoculação	24
2.2.4 Superaquecimento.....	25
2.3 Técnica de excitação por impulso.....	25
2.3.1 Modos de vibração.....	25
2.3.2 Vibração longitudinal de barras	26
2.3.3 Vibração flexional de barras	26

2.3.4 Vibração torcional de barras	28
2.4 Módulos de elasticidade	29
2.4.1 Módulo de elasticidade ou módulo de Young	29
2.4.2 Efeitos da grafita no módulo de elasticidade	30
2.4.3 Módulo da elasticidade – ASTM A36.	31
2.5 Caracterização dos ferros fundidos	33
2.5.1 Ensaios mecânicos	33
2.5.2 Ensaio metalográfico	33
2.5.3 Ultrassom.....	34
2.5.4 Comparativo entre os meios de caracterização	34
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	36
3.1 Materiais	36
3.2 Hipótese experimental	37
3.3 Procedimento experimental	39
3.3.1 Técnica de excitação por impulso segundo a norma ASTM E-1876-09	39
3.3.1.1 Frequência fundamental ressonante flexional (<i>in-plane</i>)	39
3.3.1.2 Frequência fundamental ressonante flexional (<i>out-of-plane</i>).....	41
3.3.2 Equacionamento segundo a norma ASTM E-1876-09.....	41
3.3.3 Ensaios mecânicos	42
3.3.4 Ensaio metalográfico	43
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
4.1 Corpos de Prova	44
4.2 Suporte dos corpos de prova.....	45
4.3 Ensaio livre-livre.....	46
4.4 Ensaio bi apoiado	48
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	52
REFERÊNCIAS	53
APÊNDICES.....	55

1 INTRODUÇÃO

Dos materiais à disposição para um engenheiro, o aço e o ferro fundido são os mais empregados. O ferro fundido é utilizado em função das suas propriedades únicas, amortecimento vibracional, resistência ao choque térmico, boa fundibilidade e capacidade de produzir formas complexas por fundição.

Um dos materiais que vem encontrando aplicação crescente, por exemplo, em solicitações para altas temperaturas é o ferro fundido vermicular. A grafita em forma de vermes confere propriedades mecânicas e térmicas intermediárias entre o ferro fundido cinzento (alta condutividade térmica, baixa resistência e alongamento) e o ferro fundido nodular (baixa condutividade térmica, alta resistência e alto alongamento), que garante o seu bom desempenho em solicitações de fadiga térmica. (GUESSER; GUEDES, 1997).

Como quase sempre estes materiais estarão submetidos a esforços ou cargas, o conhecimento de suas características tem grande importância no projeto de peças e equipamentos, no sentido de que qualquer deformação resultante dessas cargas deve ser previsível e não excessiva ao ponto de ocorrer deformações plásticas, fadiga acelerada ou mesmo a sua fratura. E é nessa perspectiva que o conhecimento do módulo de elasticidade merece destaque.

Essa propriedade que correlaciona a deformação elástica com a tensão, terá diferentes definições dependendo do tipo de esforço aplicado. Além dos módulos elásticos, outras propriedades são igualmente importantes, como por exemplo, a resistência mecânica e a ductilidade, no caso de materiais metálicos (CASSOLINO; PEREIRA, 2010).

A medição das propriedades mecânicas é realizada através de experimentos de laboratório cuidadosamente programados, de acordo com condições regidas por normas. No caso específico dos módulos elásticos, os métodos empregados podem ser dinâmicos, através de vibrações com pequenas amplitudes de deformação, ou estáticos, que submetem o corpo de prova a uma tensão conhecida e simultaneamente mensuram a deformação induzida. Assim, as técnicas de caracterização de materiais podem ser classificadas basicamente em estáticas e dinâmicas (CASSOLINO; PEREIRA, 2010).

No caso dos métodos dinâmicos é possível obter informações tanto quantitativas (módulos elásticos) quanto qualitativas em função da integridade de um

componente mecânico, além de ter um controle de suas propriedades, como por exemplo mudanças de fase. Além disso, o corpo de prova não fica inutilizado após o ensaio e pode ser empregado em sua função normalmente ou ensaiado muitas outras vezes (CASSOLINO; PEREIRA, 2010).

Todavia, como frequentemente os materiais são selecionados para aplicações estruturais devido às suas combinações desejáveis de características mecânicas, como por exemplo, rigidez (módulos elásticos), resistência mecânica, durabilidade e economia dos recursos energéticos, o papel dos engenheiros estruturais é o de determinar as tensões e as distribuições de tensões nos materiais que estão sujeitos a cargas bem definidas. Isto pode ser obtido mediante técnicas experimentais e/ou através de análises teóricas e matemáticas de tensão que dependem do conhecimento dos módulos elásticos (CASSOLINO; PEREIRA, 2010).

Com essa visão, o presente trabalho propõe a avaliação do módulo da elasticidade, inter-relacionando as características dos ferros fundidos, as microestruturas e as frequências obtidas através da técnica de excitação por impulso para a caracterização dos mesmos.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo aplicar a técnica de excitação por impulso para caracterizar diferentes tipos de ferros fundidos, por meio da determinação do módulo da elasticidade.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Dimensionar o tamanho dos corpos de provas para excitação por impulso a fim de garantir uma boa reprodutibilidade do ensaio e facilitar a aferição das frequências;
- Determinar o módulo de elasticidade de diferentes tipos de ferro fundido por meio da técnica de excitação por impulso;

- Comparar os resultados do módulo de elasticidade obtidos pela técnica de excitação por impulso com os resultados obtidos por ensaios mecânicos;
- Investigar a influência dos diferentes tipos de microestruturas dos ferros fundidos em correlação ao módulo de elasticidade.

1.2 Justificativa

É notável o grande aumento na demanda do meio industrial pela utilização de materiais não usuais, bem como o surgimento de novas tecnologias de controle de processo dos fundidos que otimizam e buscam melhorar ainda mais a gama de materiais disponíveis para as mais diversas aplicações, buscando reduzir custos e enquadrar ainda mais esses materiais no dia-a-dia industrial. No caso dos ferros fundidos, infelizmente o processo de caracterização dos diferentes tipos ainda não é praticado de forma eficaz ou mais adequada, já que, acaba utilizando formas destrutivas, que levam tempo e um relativo custo.

A técnica de excitação por impulso em um sentido amplo é um processo por meio do qual descreve-se uma estrutura em termos de suas características naturais, que são as frequências naturais, os fatores de amortecimento e as formas modais, ou seja, suas propriedades dinâmicas (SOEIRO, 2001).

Essa análise permitirá a caracterização dos ferros fundidos sem ser necessário uma destruição da amostra, proporcionará um relativo baixo custo, já que não será necessário a aquisição de um equipamento mais rebuscado, como a máquina de ensaio universal, pretende ser uma forma rápida e garantir uma boa repetitividade.

Além disso, o desenvolvimento deste trabalho apresenta multidisciplinaridade de conhecimentos como: ciência dos materiais, processos metalúrgicos de fabricação e vibração, que são essenciais na formação em Engenharia Mecânica e por isso correspondem aos objetivos propostos de um trabalho de conclusão de curso.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Tipos de ferros fundidos

Define-se ferro fundido como “as ligas Fe-C cujo teor de carbono se situa acima de 2,0% aproximadamente”. É considerado uma liga ternária Fe-C-Si, pois o silício está frequentemente presente em teores superiores ao do próprio carbono. O elevado teor de carbono resulta em carbono parcialmente livre na forma de veios ou lamelas de grafita (CHIAVERINI, 1996).

Dentro da denominação geral de ferro fundido”, podem ser distinguidos os seguintes tipos de liga:

- Ferro fundido cinzento;
- Ferro fundido nodular;
- Ferro fundido de grafita compactada.

2.1.1 Ferro fundido cinzento

O ferro fundido cinzento é a forma mais antiga e comum de ferro fundido. É denominado assim porque sua fratura tem a aparência cinzenta.

Apresenta microestrutura composta por carbono na forma livre, grafita, em morfologia de lamelas e carbono na forma combinada, cementita (Fe_3C). Neste caso, os principais elementos de liga são o carbono e o silício, podendo haver outros, como o manganês, cromo e cobre que irão conferir aos fundidos outras características exigidas (CHIAVERINI, 1996).

A forma de lamelas de grafita exerce uma influência dominante sobre as propriedades mecânicas do ferro fundido cinzento, podem atuar como concentradores de tensões, causando deformações plásticas localizadas em baixas tensões e início da fratura em tensões mais elevadas. Como resultado o ferro fundido cinzento não apresenta um comportamento elástico, embora forneça excelente usinabilidade, amortecimento e propriedades de auto lubrificação. (RIO TINTO IRON & TITANIUM, INC, 1998)

2.1.1.1 Propriedades do Ferro fundido cinzento – Composição.

O Ferro fundido cinzento é produzido comercialmente utilizando uma vasta gama de composições. Suas especificações podem utilizar porcentagens diferentes de elementos químicos para aproveitar um baixo custo de matérias-primas disponíveis localmente e para garantir propriedades as necessárias. (KRAUSE E HENDERSON, 1968)

A faixa de composição que pode ser encontrada nos ferros fundidos cinzentos pode ser observada na tabela 1.

Tabela 1 - Composição química; (SAE J431 Grade G3000 ou equivalente ASTM Classe 30)

Elemento:	%
Carbono - C%	2,9 – 3,65
Silício - Si%	1,8 - 2,9
Manganês - Mn%	0,5 - 0,7
Fósforo - P%	0,30 Máx
Enxofre - S%	0,10 Máx

Fonte: Krause e Henderson, 1968.

Elementos como molibdênio, níquel, vanádio, titânio, antimônio, cromo, cobre e estanho podem estar presentes também na composição dos cinzentos e sua quantidade varia de acordo com a aplicação ou a série do fundido. (KRAUSE; HENDERSON, 1968)

O carbono é de longe o elemento mais importante nos ferros fundidos cinzentos. A grafita que se apresente na forma de flocos consegue reduzir bastante a resistência a tração da matriz. Além disso, segundo Krause e Henderson (1968) é possível produzir todas as designações de cinzento ajustando basicamente o teor de carbono e silício presentes no fundido.

2.1.1.2 Propriedades do ferro fundido cinzento – módulo de elasticidade

Os ferros fundidos cinzentos não obedecem à Lei de Hooke, e com isso o módulo de elasticidade é geralmente determinado arbitrariamente como a inclinação da linha que une a origem da curva tensão-deformação com o ponto correspondente

a resistência à tração (módulo secante). Alguns engenheiros usam a inclinação da curva de tensão-deformação perto da origem (módulo tangente). (WALTON, C. F. e OPAR, T. J., 1981)

O módulo secante é um valor conservador adequado para a maioria dos projetos de engenharia; cargas de projeto raramente são tão altas quanto um quarto da força de tração, e o desvio da curva de tensão-deformação de linearidade é geralmente inferior a 0,01% para estas cargas. No entanto, na concepção de certos tipos de máquinas, tais como equipamentos de precisão, onde as tensões de projeto são muito baixas, o uso do módulo tangente pode representar a situação real com mais precisão. (WALTON, C. F. e OPAR, T. J., 1981)

Curvas típicas de tensão-deformação para ferro fundido cinzento são mostrados na figura 1.

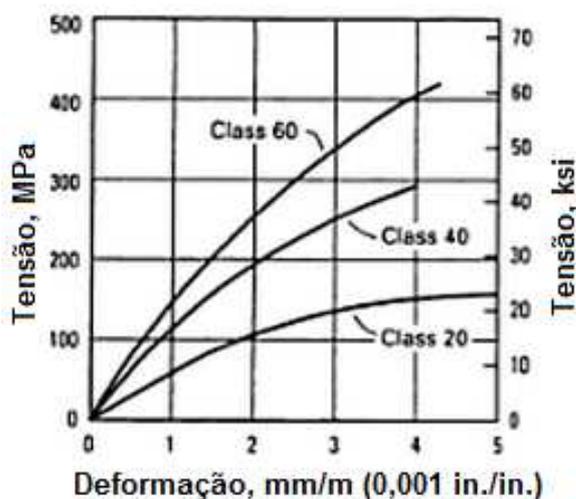


Figura 1 – Curva típica tensão x deformação para três classes de ferro fundido cinzento. FONTE: (WALTON, C. F. e OPAR, T. J., 1981)

No caso dos ferros fundidos cinzento, o módulo de elasticidade varia consideravelmente mais do que em outros metais. A tabela 2 indica as faixas encontradas para as classes de ferro fundido cinzento de acordo com a norma *ASTM - A48*.

Tabela 2 - Módulo de elasticidade típico para barras de ferro fundido cinzento.

ASTM A 48	Módulo da elasticidade	
Classe:	GPa	10 ⁶ psi
20	60 - 97	9,6 - 14,0
25	79 - 102	11,5 - 14,8
30	90 - 113	13,0 - 16,4
35	100 - 119	14,5 - 17,2
40	110 - 138	16,0 - 20,0
50	130 - 157	18,8 - 22,8
60	141 - 162	20,4 - 23,5

Fonte: WALTON, C. F. e OPAR, T. J., 1981

É importante ressaltar que segundo Krause e Henderson (1968) os ferros fundidos cinzentos G3000 designados pela norma SAE - J431 tem as mesmas características da classe 30 designada pela ASTM A48.

Krause e Henderson (1968) afirmam ainda que para essa classe o módulo de elasticidade fica numa faixa mais ampla do que os valores observados na tabela 2, de 82 a 138 GPa.

Em contrapartida, Van Vlack (1984) cita que o módulo de elasticidade dos ferros fundidos classe 30 varia de 90 a 113 GPa em função das condições de sua fundição.

2.1.2 Ferro fundido nodular

O ferro fundido nodular é obtido por modificações químicas na composição do material no estado líquido. Sua superfície de fratura apresenta coloração prateada (CHIAVERINI, 1996).

O carbono na forma de nódulos, confere a este tipo de ferro propriedades mecânicas que o aproximam do aço, como ductilidade, usinabilidade e resistência mecânica.

A tabela 3 descreve a faixa descrita na literatura da composição do nodular SAE D5506.

Tabela 3 - Composição química SAE D5506

Composição Química SAE D5506	
Estrutura metalográfica	Ferrítica /perlítica
Carbono - C%	3,0 - 3,6
Silício - Si%	2,3 - 2,9
Manganês - Mn%	0,3 – 0,6
Fósforo - P%	0,06 Máx
Magnésio – Mg%	0,030 – 0,055
Enxofre - S%	0,04 Máx

Fonte: ASTM A536 (2009).

2.1.2.1 Propriedades do Ferro fundido nodular – Módulo de elasticidade

A Figura 2 mostra que em baixas tensões de tração, há uma relação linear ou proporcional entre a tensão e deformação. Esta relação é conhecida como Lei de Hooke e o declive da linha reta é chamado de módulo de elasticidade ou módulo de Young.

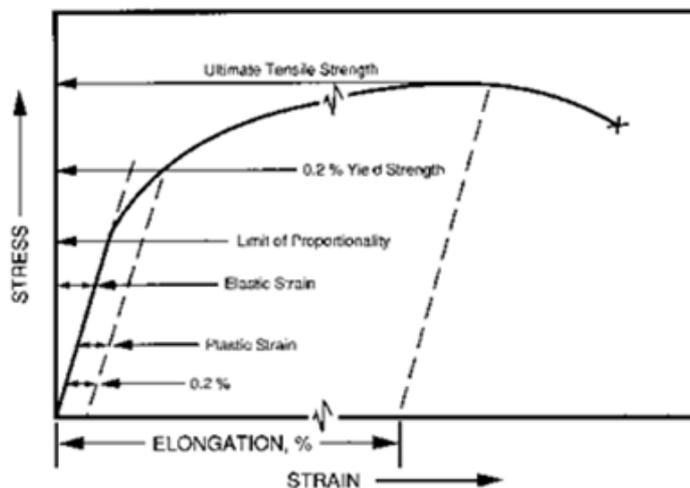


Figura 2 – Curva típica Tensão x Deformação para ferro fundido nodular.
Fonte: Rio Tinto Iron & Titanium, Inc. (1998).

A curva tensão x deformação inicial do ferro fundido nodular situa-se entre as curvas de aço carbono e do ferro fundido cinzento, como observado na figura 3. (RIO TINTO IRON & TITANIUM, INC, 1998)

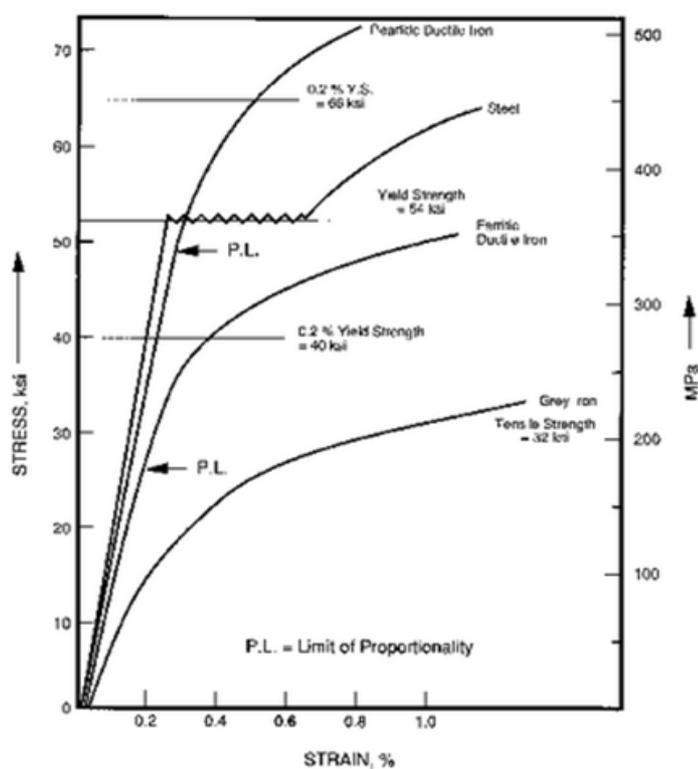


Figura 3 – Comparação entre a curva Tensão x deformação dos ferros fundidos nodulares e outros materiais

Fonte: Rio Tinto Iron & Titanium, Inc. (1998).

O ferro fundido nodular exibe uma relação de tensão-deformação semelhante a do aço, mas que é limitada pelo aparecimento gradual de deformações plásticas. O módulo de elasticidade para ferro fundido nodular varia de 162 -170 GPa. (RIO TINTO IRON & TITANIUM, INC, 1998)

Para Krause e Henderson (1968) o módulo de elasticidade do ferro fundido nodular classe 80-55-06 é de 168 GPa.

Tabela 4 - Módulo de elasticidade para diferentes classes de ferro fundido nodular.

Classe	Dureza HB	Tensão de ruptura		Tensão de escoamento		Alongamento em 50 mm, %	Módulo		Poisson
		Mpa	Ksi	Mpa	Ksi		Gpa	10 ⁶ psi	
Tensão									
60-40-18	167	461	66,9	329	47,7	15	169	24,5	0,29
65-45-12	167	464	7,3	332	48,2	15	168	24,4	0,29
80-55-06	192	559	81,1	362	52,5	11,2	168	24,4	0,31
120-90-02	331	974	141,3	864	125,3	1,5	164	23,8	0,28

Fonte: WALTON, C. F. e OPAR, T. J., 1981.

2.1.2.2 Coeficiente de Poisson

Proporção de Poisson, é a relação entre a deformação elástica lateral e a deformação elástica longitudinal produzida durante um ensaio de tração, apresenta pouca variação em ferro fundido nodular. Um valor comumente aceito é 0,275. (RIO TINTO IRON & TITANIUM, INC, 1998)

2.1.2.3 Limite de proporcionalidade

O limite de proporcionalidade é a tensão máxima que um material resiste sem sofrer deformação permanente. Quando um material é submetido a esforços abaixo do limite de proporcionalidade e a tensão é removida, a curva de tensão-deformação retorna à origem, sem ocorrer nenhuma alteração permanente nas dimensões. Quando a tensão excede o limite de proporcionalidade, a deformação plástica reduz a inclinação da curva de tensão-deformação. (RIO TINTO IRON & TITANIUM, INC, 1998)

Em ferros fundidos nodulares, que exibem uma transição gradual de elástico a um comportamento plástico, o limite proporcional é definido como a tensão requerida para produzir um desvio do comportamento elástico de 0,005 %. É medido pelo método de deslocamento utilizado para medir a resistência à deformação e pode também ser calculado a partir da resistência à deformação. A proporção de limite de proporcionalidade a 0,2 % da força de rendimento é tipicamente 0,71 para os aços inoxidáveis ferríticos, diminuindo para 0,56 para as classes martensíticas perlíticas e temperadas. (RIO TINTO IRON & TITANIUM, INC, 1998)

2.1.2.4 Limite de Resistência

Limite de resistência é a tensão na qual um material começa a apresentar deformação plástica significativa. A transição brusca de comportamento elástico para plástico exibido por aços recozidos e normalizados dá uma definição simples e clara do limite de resistência.

Para ferro fundido dúctil o método de deslocamento usado é o qual a resistência à deformação é medida a um desvio especificado a partir de uma relação linear entre a tensão e deformação. Este desvio é geralmente de 0,2%, definido por especificações internacionais. (RIO TINTO IRON & TITANIUM, INC, 1998)

2.1.2.5 Resistência a tração

A resistência à tração é a carga máxima em que o material irá suportar antes da fratura. É calculada dividindo a carga máxima aplicada durante o ensaio de tração pela área da seção transversal original da amostra. Resistência à tração para ferro fundido nodular fica em torno de 414 MPa. (RIO TINTO IRON & TITANIUM, INC, 1998)

2.1.3 Ferro fundido de grafita compactada

Também chamado de ferro fundido vermicular, é um ferro fundido obtido pela adição do titânio na composição do ferro fundido nodular, com a finalidade de degenerar o nódulo de grafita (CHIAVERINI, 1996).

Apresenta propriedades intermediárias entre os ferros fundidos nodular e cinzento. É um material cuja aplicação tem sido cada dia mais ampla, porém ainda é novo no mercado industrial. Sua fratura apresenta-se na forma mesclada (CHIAVERINI, 1996).

2.2 Fatores que afetam a grafita nos ferros fundidos

A grafita é a forma estável do carbono puro no ferro fundido, suas principais características físicas são a baixa densidade, baixa dureza, elevada condutividade térmica e a lubrificidade. (RIO TINTO IRON & TITANIUM, INC, 1998)

A microestrutura, a composição química, a seção do fundido e outras características como velocidade de resfriamento, forma da grafita, dimensão dos veios e até a distribuição desses, afetam diretamente as propriedades mecânicas dos ferros fundidos. A dureza e a resistência mecânica, por exemplo, podem ser influenciadas

pela quantidade de grafita que, em grandes quantidades caracterizará uma microestrutura mais maleável e menos resistente no material.

A Figura 4 identifica os diferentes tipos de grafita nos ferros fundidos.

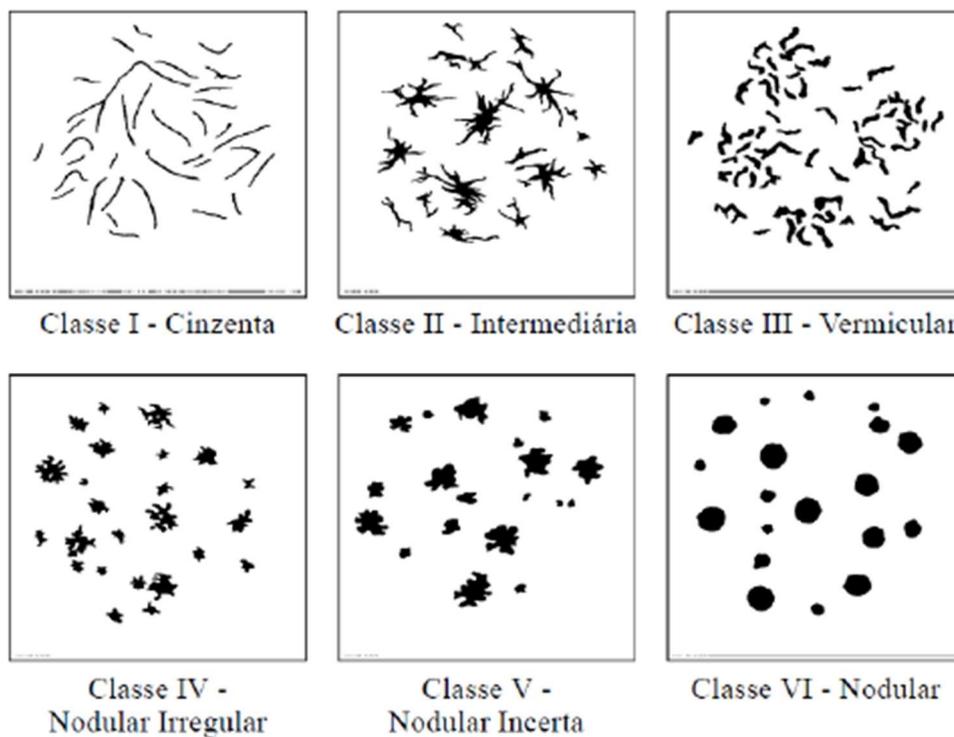


Figura 4 – Diferentes formas da grafita nos ferros fundidos.
 Fonte: ISO 945-1 (2008).

2.2.1 Composição química

Segundo CHIAVERINI (1996), os elementos que mais influenciam na estrutura dos ferros fundidos são o carbono e o silício. O carbono determina a quantidade de grafita que se pode formar e o silício é essencialmente o elemento grafitizante, que favorece a decomposição do carboneto de ferro. A presença do silício, independentemente do teor de carbono, pode fazer um ferro fundido tender para o cinzento ou para o branco.

Outros elementos como manganês, enxofre, fósforo, etc., em proporções mais elevadas do que aquelas encontradas habitualmente nos aços comuns exercem notável influência sobre a textura e as propriedades dos ferros fundidos, porque, é de suas proporções que muito depende se haverá ou não formação de grafita e, portanto, a classificação do produto resultante (COLPAERT, 2008).

2.2.2 Velocidade de resfriamento

Velocidade de resfriamento é, em linhas gerais, o fator que relaciona a velocidade de resfriamento propriamente dita durante a solidificação no interior dos moldes e a espessura das peças moldadas. Em outras palavras, seções espessas significam velocidades de resfriamento relativamente lentas e seções finas velocidades rápidas. O que significa também que em peças de seções de diferentes espessuras, ocorrem diversas velocidades de resfriamento. CHIAVERINI (1996).

Velocidades de resfriamento altas influenciarão no tempo para a decomposição da cementita, de modo que, dependendo dos teores de carbono e silício, pouca ou nenhuma grafitação ocorrerá e haverá tendência para formar-se ferro fundido branco CHIAVERINI (1996).

A velocidade de resfriamento não influi apenas na grafitação; outra ação importante é na forma, distribuição e tamanho dos veios de grafita. Velocidades altas produzem veios finos, com uma distribuição dendrítica, comumente indesejável. Velocidades médias resultam em distribuição e tamanhos normais, e velocidades lentas em uma distribuição de veios grosseiros de grafita CHIAVERINI (1996).

2.2.3 Inoculação

Basicamente a inoculação consiste na adição de uma liga metálica, no metal, enquanto estiver líquido, quer no próprio forno ou na “panela de fundição”, pouco antes do vazamento do metal ou no jorro do metal líquido quando da passagem do forno para a panela de vazamento. Essa prática irá provocar o aparecimento de “núcleos” no metal fundido, nos quais a formação de grafita pode iniciar “mais facilmente”. O efeito consiste numa tendência a grafitação, desestabilizando a perlita. Isso provocará uma formação de veios menores de grafita, com distribuição mais uniforme e a melhora nas propriedades do fundido (CHIAVERINI, 1996).

2.2.4 Superaquecimento

O superaquecimento resulta em início de grafitização a temperaturas mais baixas, o que promove a formação de veios menores e mais finos de grafita. Além disso, o material se torna menos sensível as variações de seção da peça. (CHIAVERINI, 1996).

A temperatura na qual o metal é vazado no molde também tem grande influência: quanto mais alta for, mais fluido será o metal e melhor esse tomará a forma do molde; por outro lado, o aquecimento deste será muito maior antes da solidificação se iniciar, o que diminuirá a velocidade de resfriamento, influenciando nas propriedades mecânicas e características do fundido (COLPAERT, 2008).

2.3 Técnica de excitação por impulso

A Técnica de Excitação por Impulso é um ensaio não destrutivo para a determinação dos módulos de elasticidade dinâmicos e do amortecimento de materiais através das frequências naturais de vibração. O procedimento de caracterização de materiais empregando a Técnica de Excitação por Impulso consiste em excitar o corpo de prova com um leve impulso mecânico e em calcular os módulos de elasticidade e o amortecimento a partir das frequências. (RIO TINTO IRON & TITANIUM, INC, 1998)

2.3.1 Modos de vibração

O princípio dos ensaios dinâmicos consiste em calcular os módulos elásticos a partir das frequências naturais de vibração do corpo de prova e de seus parâmetros geométricos. Estas frequências, em conjunto com as dimensões e massa, possuem uma relação unívoca com os módulos elásticos. Os métodos dinâmicos possuem a vantagem de empregar pequenas amostras e serem rápidos e não destrutivos (CASSOLINO; PEREIRA, 2010).

2.3.2 Vibração longitudinal de barras

Ondas longitudinais são aquelas em que a vibração ocorre na mesma direção do movimento da onda. A vibração longitudinal de barras de seção transversal quadrada ou circular é considerada como um método de precisão na determinação do módulo de Young (PAIVA, 2002).

2.3.3 Vibração flexional de barras

De acordo com Davis *apud* Paiva (2002) o modo flexional ou transversal de vibração é o modo complexo em relação ao modo como a frequência de ressonância é afetada, devido ao comprimento e seção transversal e pela razão entre os dois.

É a mais recomendada para a determinação do módulo de Young em barras delgadas, devido a facilidade de excitar a vibração flexional, se comparando a vibração longitudinal (PAIVA, 2002).

Há uma série de nós (ponto de amplitude zero, interferência destrutiva) e anti-nós ou ventres (máximo de amplitude, interferência construtiva) ao longo do comprimento de uma barra apoiada livremente. Na menor frequência de ressonância ou frequência fundamental (modo fundamental) os pontos nodais estão localizados a $0,224L$ de cada extremidade, com os anti-nós no centro e em cada extremidade (CASSOLINO; PEREIRA, 2010).

A figura 5 ilustra os pontos de nós e anti-nós para a vibração flexional de barras.

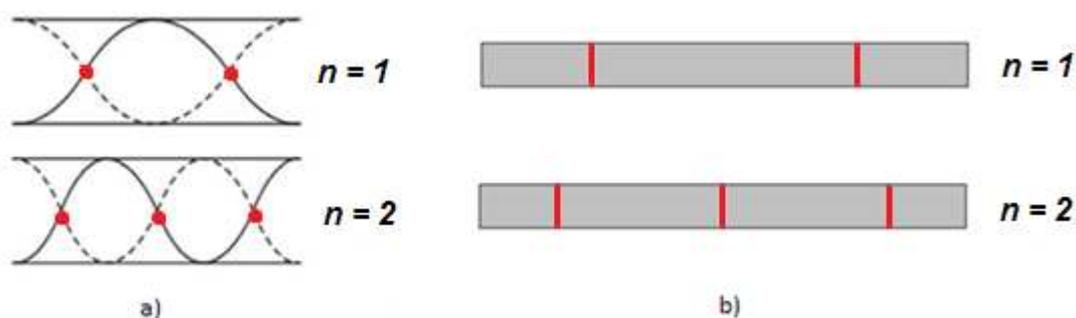


Figura 5 – (a) Ilustração da localização dos nós e anti-nós em vermelho para uma onda estacionária numa corda com extremidades livres. (b) Modo de vibração flexional para uma barra de seção retangular, com as linhas nodais indicadas em vermelho.

Fonte: ASTM E1876-09 (2009).

As linhas nodais ou os pontos mínimos de amplitude se encontrarão nas extremidades, e os pontos de máxima amplitude se encontraram no centro da barra e nas suas extremidades como pode ser visto na figura 6.

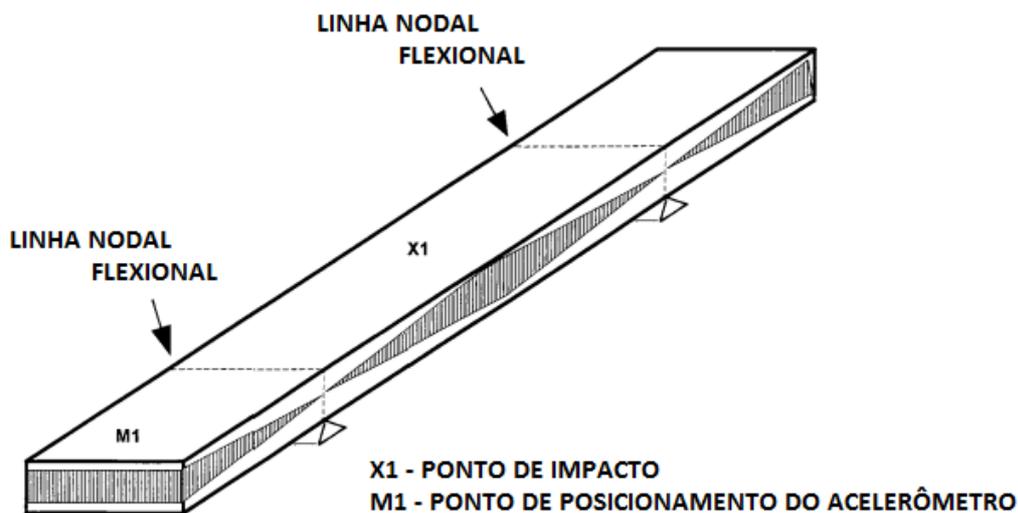


Figura 6 – Barra retangular excitada para captação das frequências flexionais
Fonte: ASTM E1876-09 (2009).

Desta forma, o modo fundamental flexional é determinado através da excitação do corpo no centro desde que está esteja bi apoiada em seus pontos nodais.

A figura 7 ilustra a posição dos nós de vibração para os modos de ressonância longitudinal, flexional (transversal) e torcional.

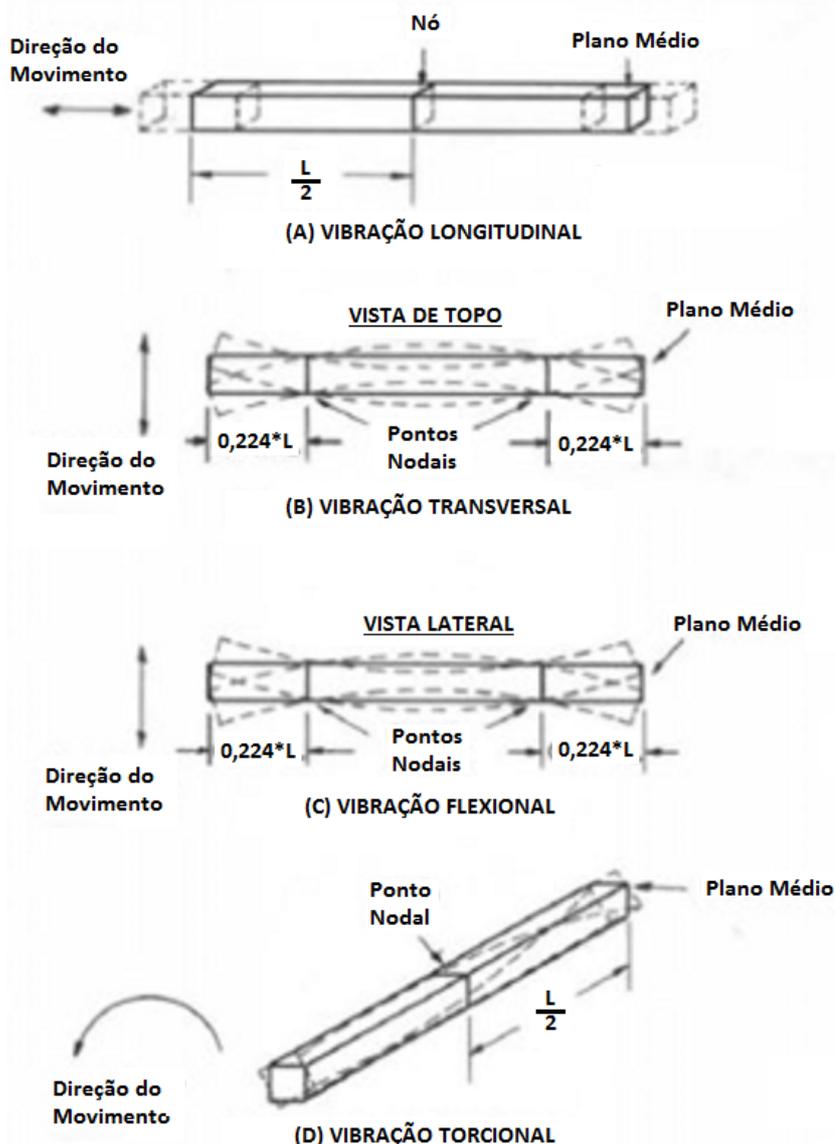


Figura 7 – Barra retangular excitada para captação das frequências flexionais
Fonte: ASTM E1876-09 (2009).

2.3.4 Vibração torcional de barras

Vibração torcional é entendida como a oscilação de um corpo em relação a um eixo de referência. O movimento é descrito por uma coordenada angular e os esforços atuantes se apresentam na forma de momentos. Desta forma o elemento elástico apresenta um momento de restauração, resultante da torção deste mesmo elemento (ASTM E1876-09).

Com este modo de vibração é possível calcular o módulo de cisalhamento e em seguida o coeficiente de Poisson. Uma barra apoiada livremente apresenta uma

série de nós (locais cuja amplitude da onda é zero, ou seja, onde ocorrem interferências destrutivas) e anti-nós ou ventres (locais onde a amplitude atinge seu valor máximo, ou seja, apresentam interferência construtiva). Para a menor frequência de ressonância chamada de frequência torcional fundamental (ou modo fundamental) temos um ponto nodal (amplitude zero) localizado no centro da barra, e os anti-nós (amplitude máxima) localizados nas extremidades (ASTM E1876-09).

2.4 Módulos de elasticidade

Os módulos elásticos são parâmetros fundamentais para a engenharia e aplicação de materiais, uma vez que estão ligados à descrição de várias outras propriedades mecânicas, como por exemplo, a tensão de escoamento, a tensão de ruptura, a variação de temperatura crítica para a propagação de trincas sob a ação de choque térmico, etc. São propriedades intrínsecas dos materiais que descrevem a relação entre tensão e deformação no regime elástico e que dependem de sua composição química, microestrutura e defeitos como, por exemplo, poros e trincas.

2.4.1 Módulo de elasticidade ou módulo de Young

O módulo de elasticidade é uma grandeza que é proporcional a rigidez de um material quando este é submetido a uma tensão externa de tração ou compressão. Basicamente, é a razão entre a tensão aplicada e a deformação sofrida pelo corpo, quando o comportamento é linear. A determinação das propriedades elásticas é importante para a descrição de várias propriedades, como por exemplo a tensão de cisalhamento dos metais, a tensão de fratura dos materiais frágeis, a variação da temperatura crítica para a propagação de trincas de um material sob a ação de choque térmico, etc. (CASSOLINO; PEREIRA 2010).

2.4.2 Efeitos da grafita no módulo de elasticidade

A grande importância que se dá a grafita vem do fato das propriedades mecânicas dos ferros fundidos dependerem em grande parte das forma, dimensões, quantidades e distribuição desse constituinte.

O módulo da elasticidade dos ferros fundidos depende efetivamente da quantidade e morfologia da grafita presente. Aumentando-se a quantidade de grafita através de um aumento no CE (Carbono Equivalente) e em função do silício, por exemplo, ocorre uma diminuição sensível do módulo de elasticidade. (OTT, 1999).

A variação do módulo de elasticidade nos diferentes tipos de ferros fundidos é resultado da variação na forma e quantidade de grafita e na estrutura da matriz. Valores altos de módulo de elasticidade são obtidos, por exemplo, com um aumento do grau de modularização, em seções finas e com uma matriz perlítica. (OTT, 1999).

Em relação a caracterização dos ferros fundidos por excitação por impulso, fica evidente que a composição química, atrelada a velocidade de resfriamento influenciam na forma, distribuição, quantidade e tamanho da grafita que, em linhas gerais, vai atuar diretamente sobre as propriedades mecânicas e sobre o módulo da elasticidade dos fundidos.

Todas as propriedades relacionadas a resistência à tração e ductilidade variam com o grau de modularização. As figuras 8 e 9, a seguir, ilustram a variação das propriedades mecânicas e do módulo da elasticidade em função da quantidade de grafita nodular (WALTON, C. F. e OPAR, T. J., 1981).

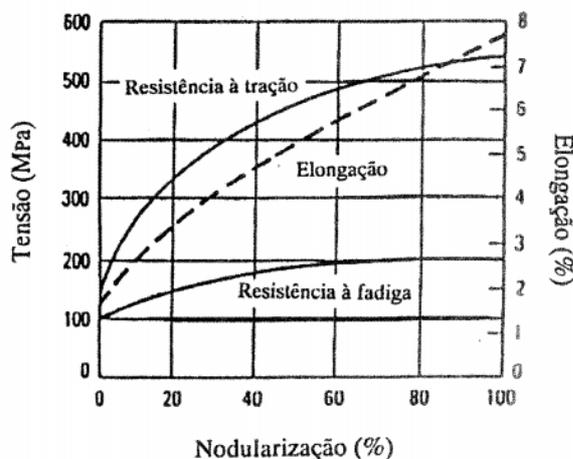


Figura 8 – Influência do grau de modularização em algumas propriedades para os ferros fundidos nodulares
Fonte: WALTON; OPAR (1981).

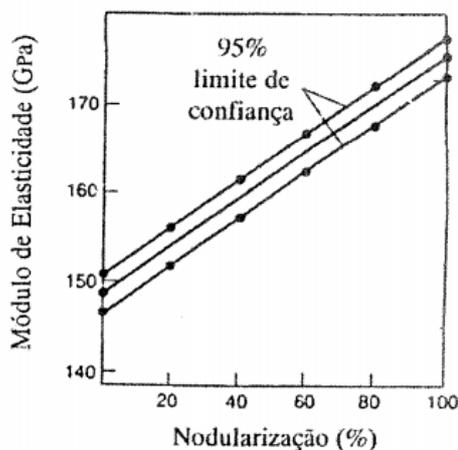


Figura 9 – Relação entre o grau de nodularização e o módulo da elasticidade
 Fonte: WALTON; OPAR (1981).

2.4.3 Módulo da elasticidade – ASTM A36.

Quando uma amostra de aço é submetida a uma carga, uma região de elasticidade inicial é observada no qual não existe qualquer deformação permanente sobre o corpo. Assim, se a carga for removida, o espécime retorna às suas dimensões originais. A proporção de tensão por deformação dentro da região elástica é o módulo de elasticidade, ou módulo de Young, E . (ROGER; FREDERICK, 2006)

Segundo este módulo é sempre de cerca de 200 GPa para todos os aços construção, o seu valor não é normalmente determinado em testes de tensão, exceto em casos especiais onde se faz necessário. (ROGER; FREDERICK, 2006)

O aço A36 é um dos mais utilizados em componentes estruturais como pontes, edifícios e outros. Curvas típicas de tensão-deformação para os aços de construção são mostrados na figura 10. (ROGER; FREDERICK, 2006)

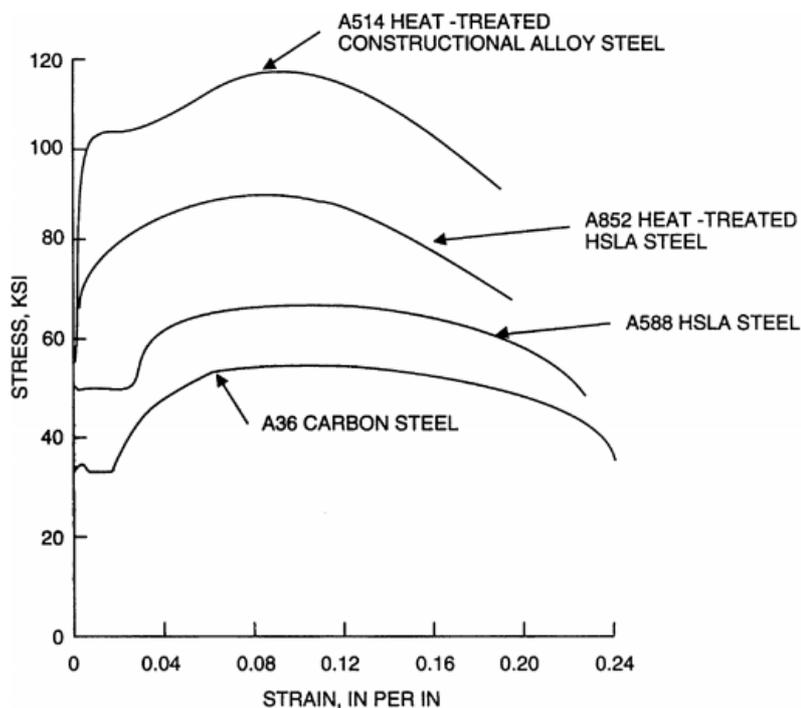


Figura 10 - Curva típica tensão x deformação para aços estruturais.
 Fonte: ROGER; FREDERICK, 2006.

A parte elástica dessas curvas são mostradas numa escala ampliada na figura 11.

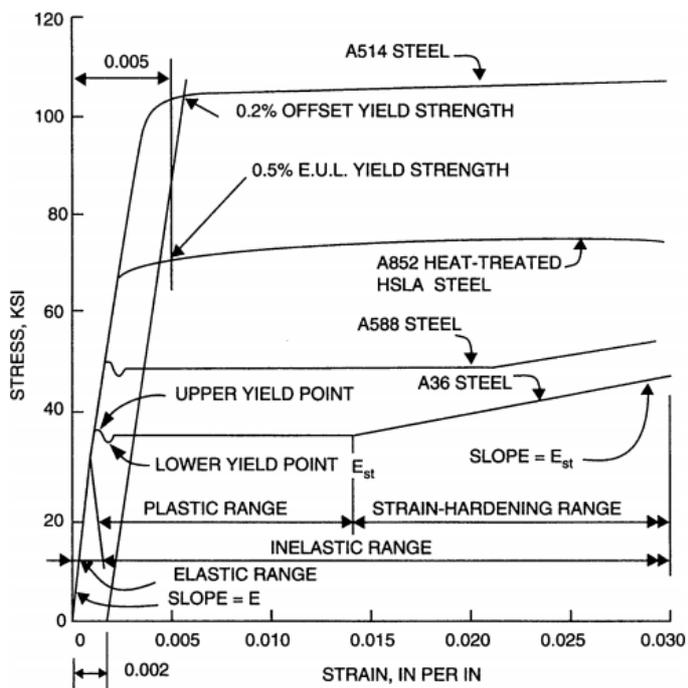


Figura 11 - Curva tensão x deformação parcial na região elástica para aços estruturais.
 Fonte: ROGER; FREDERICK, 2006.

2.5 Caracterização dos ferros fundidos

Os ferros fundidos podem ser caracterizados por ensaios mecânicos, análise microestrutural e ultrassom. Os ensaios mecânicos e a análise microestrutural são usualmente destrutivos.

2.5.1 Ensaio mecânicos

No ensaio mecânico, os corpos de prova ficam inutilizados após a realização. Consiste na aplicação de uma carga, onde o corpo de prova é submetido a uma tensão mecânica, que pode ser de tração, compressão ou de cisalhamento. Esta carga é aplicada lentamente, simultaneamente com a monitoração da deformação induzida (CASSOLINO; PEREIRA, 2010).

A aplicação de uma força, num corpo sólido promove uma deformação do material na direção do esforço. O ensaio de tração consiste em submeter uma amostra a um esforço que tende a alongá-la. Este ensaio é realizado num corpo de prova de forma e dimensões padronizadas, para que os resultados possam ser comparados ou, se necessário reproduzido (FERRARINI, 2004).

2.5.2 Ensaio metalográfico

A caracterização por esse ensaio procura relacionar a estrutura íntima do material com as suas propriedades físicas, processo de fabricação, desempenho de sua função e outros. A metalografia é dividida em macrografia ou de micrografia.

No caso da macrografia, a superfície da amostra devidamente polida e atacada por um reagente, é examinada a olho nu ou com pouca ampliação (até 50x). Por seu intermédio tem-se uma ideia do conjunto referente a homogeneidade do material, a distribuição e natureza das falhas, impurezas e ao processo de fabricação além de outras características (COLPAERT, 2008).

Por outro lado, a macrografia consiste no estudo dos produtos metalúrgicos com o auxílio do microscópio, onde se pode observar as fases presentes e identificar a granulação do material, o teor aproximado de carbono, a natureza, a forma, a

quantidade, e a distribuição dos diversos constituintes e inclusões no material (COLPAERT, 2008).

2.5.3 Ultrassom

O ensaio por ultrassom caracteriza-se num método não destrutivo que tem por objetivo a detecção de defeitos ou descontinuidades internas, presentes nos mais variados tipos ou forma de materiais ferrosos ou não ferrosos (ANDREUCCI, R. 2011).

Tais defeitos são caracterizados pelo próprio processo de fabricação da peça ou componentes a ser examinado como, por exemplo: bolhas de gás em fundidos, dupla laminação em laminados, micro trincas em forjados, escórias em uniões soldadas e muitos outros. Portanto, o ensaio não destrutivo por ultrassom, assim como todo ensaio não destrutivo visa diminuir o grau de incerteza na utilização de materiais ou peças de responsabilidade e o desperdício de peças utilizadas em ensaios destrutivos (ANDREUCCI, R., 2011).

2.5.4 Comparativo entre os meios de caracterização

Os módulos elásticos são características importantes dos materiais, uma vez que permitem projetar e garantir o bom funcionamento de peças que estejam sob a ação de algum tipo de tensão, bem como determinar outras propriedades mecânicas fundamentais.

Os métodos quase-estáticos são destrutivos, o que os torna desvantajosos, já que muitos dos materiais testados devem voltar às condições normais de serviço após a realização do ensaio. Além disso, a imprecisão das medidas é um fator que deve ser levado em consideração. (CASSOLINO; PEREIRA, 2010)

Os métodos dinâmicos, que são não-destrutivos, apresentam resultados mais precisos do que aqueles alcançados pelos métodos quase-estáticos, além de permitirem a investigação repetitiva do material, rapidez na aquisição e possibilidade de realizar testes em função da temperatura. (CASSOLINO; PEREIRA, 2010)

O método ultrassônico é bastante utilizado devido, principalmente, à sua relativa simplicidade, porém uma incerteza grande na medida origina-se da

impossibilidade de se medir a razão de Poisson e da necessidade do seu valor nos cálculos. (CASSOLINO; PEREIRA, 2010)

A tabela 5 propõe uma análise comparativa dos métodos quase-estáticos, dinâmicos e por ultrassom.

Tabela 5 - Comparativa dos métodos em função de diversos fatores.

Método:	Ensaio destrutivo	Incerteza na medida	Tempo de medida	Amostras caracterizáveis	Constantes elásticas	Medidas em função da temperatura
Métodos quase-estáticos	Sim	15%* ou mais	**	Principalmente metais	Foco no E	Difícil
Métodos dinâmicos	Não	< 2%	Segundos	Qualquer material sólido	E, G, μ (Até simultaneamente)	Fácil
Métodos por ultrassom	Não	Até 15 %*	Segundos	Qualquer material sólido	E (com μ estimado não medido)	Difícil

*Depende do valor de razão de Poisson estimada.

** Depende do equipamento e de quem executa.

Fonte: CASSOLINO; PEREIRA, 2010.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho pretende ser desenvolvido junto ao Laboratório de Materiais do Departamento de Engenharia Mecânica, UTFPR – Pato Branco, contando com o apoio do Laboratório de Vibrações e da oficina de Usinagem, também integrantes desse departamento.

3.1 Materiais

Como parâmetro inicial do método serão considerados corpos de prova de aço ASTM A36, para analisar as condições do ensaio e sua aplicabilidade. Como o aço é um material homogêneo, isotrópico e elástico, os resultados obtidos em função do módulo da elasticidade devem ser muito próximos dos encontrados na literatura. Assim a utilização desse corpo de prova pretende funcionar como uma espécie de calibração e um teste para uma possível adequação da aplicação do método no ensaio dos ferros fundidos.

Para o ensaio dinâmico dos fundidos, serão utilizados corpos de prova de cinzento SAE G3000 e nodular SAE D5506, fornecidos pela Fersul Manufaturados de Ferro em parceria com a Universidade. Os corpos de prova serão vazados em um molde de areia em Y, que terá dimensões de 240 x 40 x 13 mm, fornecidas pela norma ASTM A536. Essas amostras serão divididas em função do tipo de ferro fundido e subdivididas em três corpos de tamanhos diferentes, para que seja possível estatisticamente levar em consideração a heterogeneidade, as descontinuidades e a não isotropia do material. A tabela abaixo descreve uma relação de tipo e tamanho para as amostras:

Tabela 6 - Amostras descritas em função de seu tamanho

Ferro Fundido Cinzento	Ferro Fundido Nodular
SAE G3000 – 230x35x10mm – Corpo de prova 1	SAE D5506 – 230x35x10mm – Corpo de prova 4
SAE G3000 – 210x35x10mm – Corpo de prova 2	SAE D5506 – 210x35x10mm – Corpo de prova 5
SAE G3000 – 190x35x8mm – Corpo de prova 3	SAE D5506 – 190x35x8mm – Corpo de prova 6

Fonte: Os autores (2014).

A composição química do ferro fundido nodular SAE J434 D5506 é descrita na tabela 7.

Tabela 7 – Composição química do Ferro Fundido nodular J434 D5506.

Elemento:	%
Carbono - C%	3,57%
Silício - Si%	2,61%
Manganês - Mn%	0,22%
Fósforo - P%	0,044%
Enxofre - S%	0,014%
Magnésio – Mg%	0,041%
Cobre – Cu%	0,5%

3.2 Hipótese experimental

Os laboratórios de usinagem e materiais serão utilizados para a adequação dos corpos de prova nas dimensões necessárias para o experimento. Estes devem ser confeccionados respeitando a relação entre o comprimento e a menor dimensão da sessão retangular como informado pela norma.

O primeiro ensaio será feito para o aço ASTM A36, considerando uma relação de comprimento e espessura de 20~25 para facilitar a aplicação do equacionamento e do fator de correção (T_1) para o módulo da elasticidade.

O método será aplicado utilizando o acelerômetro como transdutor e um martelo de impacto como excitador. A técnica de excitação por impulso será aplicada visando obter a função resposta de frequência (FRF) e através desta determinar a primeira frequência ressonante fundamental.

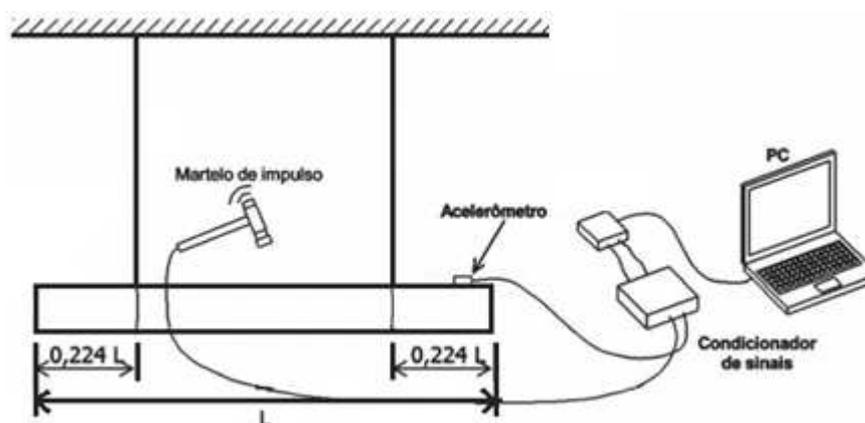


Figura 12 – Esquema do aparato utilizado no procedimento experimental
 Fonte: Os autores (2014).

As dimensões, a massa do corpo e a frequência fundamental flexional ressonante serão utilizadas para o cálculo do módulo da elasticidade dinâmico para a amostra de ASTM A36. Os resultados serão comparados com a literatura e possíveis problemas encontrados deverão ser considerados para o ensaio dos ferros fundidos.

Com relação aos ferros fundidos, os corpos de prova já se encontram com dimensões pré-estabelecidas em norma, como descrito no tópico de materiais. A proposta é aproveitar o mesmo corpo de prova para diferentes tamanhos, como descrito na tabela 4, visando estatisticamente avaliar a influência do tamanho, porosidades e descontinuidades nos ferros fundidos.

A determinação do módulo de elasticidade partirá em função da vibração flexional que pretende ser obtida pelo procedimento “*in-plane*” descrita no procedimento experimental. O cálculo do módulo de elasticidade será em função da massa, das dimensões do corpo de prova e de um fator de correção que surge basicamente pela relação de espessura e comprimento.

Os corpos de prova para o método dinâmico vão ser posicionados em um suporte bi apoiado e a resina utilizada para fixação do transdutor será de cera de abelha. Tanto os apoios quanto a resina podem causar interferência na medição dos modos fundamentais das amostras. Além disso, o peso do acelerômetro deverá ser levado em consideração, para que este não interfira nas aferições do sistema.

Em função dos resultados obtidos no ensaio dinâmico, pretende-se por meio de ensaios mecânicos fazer uma comparação entre resultados, propondo uma análise da caracterização e de fatores que possam ter influenciado nas propriedades elásticas desses materiais. Os corpos de prova utilizados nos ensaios mecânicos pretendem ser confeccionados com as mesmas amostras dos ensaios dinâmicos.

A análise metalográfica será feita para identificar os tipos de grafita e a sua influência no módulo de elasticidade dos diferentes tipos de ferro fundido analisados. Uma pequena amostra do corpo de prova utilizado no ensaio dinâmico será utilizada, e o procedimento de análise será feito como descrito no tópico ensaio metalográfico.

3.3 Procedimento experimental

O procedimento será baseado na Norma ASTM E-1876-09 que abrange a determinação dos módulos elásticos dinâmicos de materiais elásticos pelo método de excitação por impulso. A formulação proposta padroniza os procedimentos experimentais necessários para a determinação do módulo de elasticidade dinâmico, pela medição das frequências fundamentais longitudinal dos corpos de prova. O ensaio consiste basicamente na utilização de um excitador, um sensor e um analisador digital de sinais.

3.3.1 Técnica de excitação por impulso segundo a norma ASTM E-1876-09

A ASTM E-1876-09 informa que o experimento é especialmente aplicável a materiais elásticos, homogêneos e isotrópicos. Materiais contendo agregados, fibras, defeitos como porosidade, compósitos ou não homogêneos podem ser testados, mas características como tamanho, morfologia, distribuição e outras devem ser levadas em conta na análise dos resultados, já que atuam de forma direta nas propriedades elásticas do material.

Além disso, como já dito anteriormente, o procedimento assume que a escolha das dimensões da amostra seja feita de modo que a razão entre o comprimento e a menor dimensão da sessão retangular do corpo de prova seja de no mínimo 5. Ao mesmo tempo, uma razão de 20 ~ 25 deve ser preferida para que facilite a aplicação do equacionamento para a determinação do módulo de elasticidade sem a necessidade de conhecer o coeficiente de Poisson.

3.3.1.1 Frequência fundamental ressonante flexional (*in-plane*)

A Norma ASTM E-1876-09 recomenda posicionar o corpo de prova sobre os suportes localizados em pontos nodais fundamentais (0,224 L de cada extremidade), conforme a figura 13. Em seguida determinar a direção de maior sensibilidade para o transdutor, orientando o mesmo para que possa detectar a vibração pretendida.

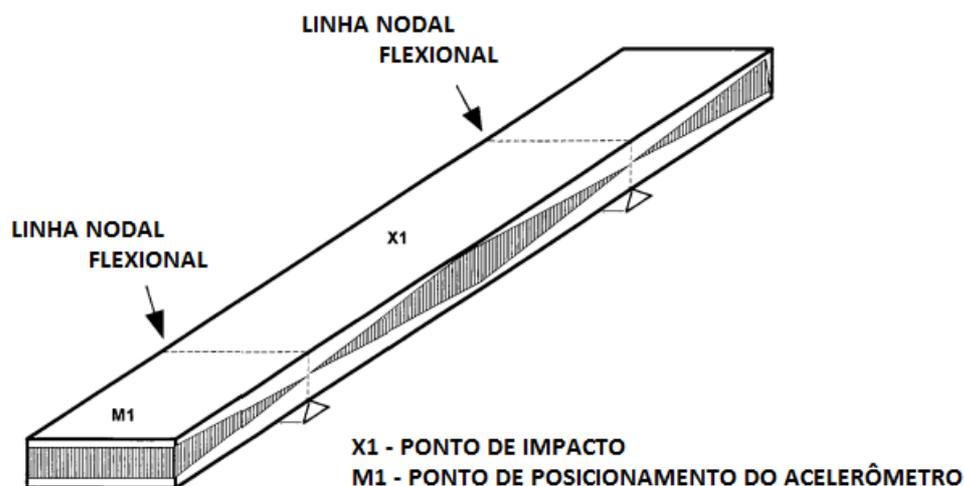


Figura 13 - Barra retangular excitada para captura das frequências flexionais
Fonte: ASTM E1876-09 (2009).

Os transdutores podem estar em contato direto ou não com o corpo de prova. No contato direto o transdutor é posicionado apenas na medida dos pontos nodais necessários para a obtenção de uma leitura (Fig. 13). Esta localização irá minimizar o efeito do amortecimento causado pelo transdutor de contato, caso o transdutor for posicionado em um local de deslocamento máximo (anti-nodal), o mesmo pode carregar a massa do corpo de prova e modificar a vibração natural. A força de contato do transdutor também deve ser consistente, com boa resposta e interferência mínima com a vibração livre do corpo de prova.

Para transdutores sem contato, o mesmo deve se posicionar sobre um ponto anti-nodal e perto da superfície do corpo de prova para pegar a vibração desejada, mas não tão perto de forma que possa interferir na vibração livre.

Para se obter a frequência fundamental ressonante flexional, deve-se bater na amostra com o excitador, levemente e elasticamente, na posição central do corpo de prova ou no lado oposto de onde está localizado o transdutor de detecção (Fig. 13). Em seguida, grava-se a leitura resultante e repete-se o ensaio até cinco leituras consecutivas, obtendo uma média para determinar a frequência de ressonância fundamental flexional.

3.3.1.2 Frequência fundamental ressonante flexional (*out-of-plane*)

O procedimento é o mesmo que para a obtenção da frequência fundamental ressonante flexional (fora do plano de flexão), com exceção de que a direção de vibração está no plano principal da amostra. Esta medição pode ser realizada de duas maneiras.

Na primeira forma, mova o transdutor e excitador em 90° em torno do eixo do corpo de prova para introduzir e detectar vibrações no plano principal. No método alternativo, girar o corpo de prova em 90° ao longo do seu eixo e reposicionar nos suportes de amostras, invertendo assim a ordem das dimensões de largura e espessura nos cálculos.

Para materiais homogêneos e isotrópicos, os módulos calculados devem ser os mesmos que os módulos calculados a partir da frequência fora do plano de flexão. A comparação dos dois casos (no plano de flexão e fora do plano de flexão) para as medições de frequência podem ser utilizadas como uma verificação dos cálculos e resultados dos métodos experimentais.

3.3.2 Equacionamento segundo a norma ASTM E-1876-09

Existem diferentes modelos matemáticos para cada tipo de excitação aplicada ao corpo de prova, para correção da massa do acelerômetro e etc. A norma ASTM E-1876-09 descreve alguns destes modelos em função da forma como os corpos de prova são excitados: flexional e torcional.

No presente trabalho, serão excitados em flexão corpos de prova de seção retangular. O módulo de elasticidade para esse evento pode ser calculado como:

$$E = 0,9465 \times \frac{m \times f_f^2}{b} \times \left[\frac{L}{t} \right]^3 \times T_1 \quad (\text{Eq. 1})$$

O fator de correção T_1 pode ser calculado pela seguinte equação:

$$T_1 = 1 + 6,585 \times (1 + 0,0752 \times \mu + 0,8109 \times \mu^2) \times \left[\frac{t}{L} \right]^2 - 0,868 \times \left[\frac{t}{L} \right]^4 -$$

$$\left[\frac{8,34 \times (1 + 0,2023 \times \mu + 2,173 \times \mu^2) \times \left(\frac{t}{L} \right)^4}{1 + 6,338 \times (1 + 0,1408 \times \mu + 1,536 \times \mu^2) \times \left(\frac{t}{L} \right)^2} \right] \quad (\text{Eq. 2})$$

Além disso, se $L/t \geq 20$, T_1 pode ser simplificado pela seguinte equação:

$$T_1 = 1 + 6,585 \times \left[\frac{t}{L} \right]^2 \quad (\text{Eq. 3})$$

3.3.3 Ensaio mecânicos

Segundo a norma ASTM E-8M-11, o comprimento da parte útil dos corpos de prova utilizados no ensaio de tração devem corresponder a 4 vezes o diâmetro da seção desta parte. As dimensões recomendadas pela norma são abordadas na tabela 7.

Tabela 8 - Dimensões dos corpos de prova utilizados nos ensaios de tração

Dimensões, mm [in] - Para corpos de prova com comprimento útil de quatro vezes o diâmetro.

G - Comprimento da parte útil	36,00 ± 0.10 [1.400 ± 0.005]
D - Diâmetro	9,00 ± 0.10 [0.350 ± 0.007]
R - Raio de concordância, min	8,00 [0.25]
A - Comprimento da seção reduzida	45,00 [1.75]

Fonte: Norma ASTM E-8M-11 (2011).

O corpo de prova deverá ter no mínimo 8 mm de diâmetro e 50 mm de comprimento útil, não sendo possível adotar um corpo de prova com essas dimensões deverá ser utilizada a proporção descrita acima. A figura 14, ilustra o corpo de prova:

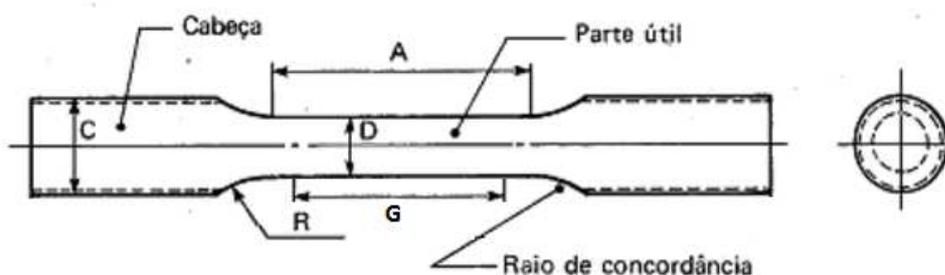


Figura 14 – Ilustração do corpo de prova utilizado no ensaio de tração

Fonte: Norma ASTM E-8M-11 (2011).

Inicialmente deve-se medir o corpo de prova para se obter o diâmetro que será usado no cálculo da área. Essa medição deve ser feita em no mínimo dois pontos do corpo de prova, para que possamos ter um diâmetro médio. Além do diâmetro,

devemos medir o comprimento inicial do corpo de prova, pois o utilizaremos no cálculo da deformação e para obter as propriedades elásticas.

Após a realização de todas as medidas, fixa-se o corpo de prova na máquina de tração por suas extremidades, numa posição que permita ao equipamento aplicar um esforço longitudinal no corpo de prova até a sua ruptura.

Ao longo do experimento devem ser feitas leituras da deformação conforme o aumento da carga. Essa leitura é feita por um extensômetro fixado junto a máquina.

Ao término do experimento é feita a medição do comprimento final e do diâmetro final, com esses dados é possível calcular a deformação, a estricção, esboçar o diagrama tensão x deformação e obter as propriedades elásticas.

3.3.4 Ensaio metalográfico

Utiliza-se a metalografia para relacionar a estrutura íntima do material (constituintes da microestrutura) com as suas propriedades físicas, processo de fabricação e com o desempenho de suas funções.

Para o presente trabalho irá se fazer uso de micrografia, que consiste na obtenção de um pedaço do corpo de prova fazendo uso do disco de corte, onde é realizado um corte de forma lenta e progressiva, promovendo um arrefecimento para a amostra.

Posteriormente, realiza-se o embutimento a quente da amostra, colocando-a em uma prensa embutidora, juntamente com uma resina, usualmente se utiliza baquelite, devido a sua dureza relativamente alta e seu baixo custo.

A fim de garantir um melhor acabamento para a amostra será realizado um lixamento e um polimento manual, eliminando assim riscos e marcas mais profundas na superfície.

Por fim, realiza-se o ataque da amostra com um reagente ácido adequado, facilitando assim a posterior visualização dos contornos de grãos e diferentes fases da microestrutura no microscópio.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Corpos de Prova

Os corpos de prova de aço, ferro fundido cinzento e ferro fundido nodular foram usinados de forma que respeessem a relação de comprimento e espessura indicados no procedimento experimental.

Verificou-se que o acabamento superficial e as tolerâncias do corpo de prova são fatores relevantes para a aplicação do teste. Percebeu-se que o acabamento superficial influencia na estabilidade dos corpos de prova quando apoiados, e essa estabilidade age diretamente nos valores encontrados de frequência ressonante fundamental.

As dimensões do corpo de prova também foram decisivas no cálculo do módulo de elasticidade, tendo em vista que uma pequena variação da espessura resultou em grandes alterações no módulo de elasticidade.

Os corpos de prova receberam uma identificação, como descritos na tabela 8.

Tabela 9 – Identificação dos corpos de prova

Nome	Designação
CPA1	Corpo de prova 1 – ASTM A-36
CPA2	Corpo de prova 2 – ASTM A-36
CPA3	Corpo de prova 3 – ASTM A-36
CPC1	Ferro Fundido Cinzento – 1
CPC2	Ferro Fundido Cinzento – 2
CPC3	Ferro Fundido Cinzento – 3
CPN0	Ferro Fundido Nodular – 0
CPN1	Ferro Fundido Nodular – 1
CPN2	Ferro Fundido Nodular – 2
CPN3	Ferro Fundido Nodular – 3

Fonte: Os autores (2014).

Como a influência do acabamento e variações dimensionais influenciaram significativamente sobre os resultados obtidos os corpos de prova passaram por um processo de retifica, corrigindo suas dimensões iniciais.

As dimensões e tolerâncias de usinagem finais dos corpos de provas estão descritas no apêndice A, B e C.

A figura 15 ilustra os corpos de prova com a designação estipulada.



Figura 15 – Ilustração dos corpos de prova com sua designação
Fonte: Os autores (2014).

4.2 Suporte dos corpos de prova

O suporte para o ensaio dos corpos de prova bi apoiados foram construídos em duas peças, garantindo sua rigidez e estabilidade quando fixado no aparato. Elaborou-se os apoios de maneira que possuíssem uma largura mínima, assegurando a estabilidade dos corpos ensaiados.

Utilizou-se uma cunha na superfície em contato com o corpo ensaiado, na tentativa de causar o mínimo contato entre os apoios e os corpos ensaiados. Um rasgo foi feito na parte horizontal, para que o posicionamento dos apoios acontecesse de forma fácil a 0,224 do comprimento total do corpo de prova. As dimensões do apoio e tolerâncias são descritas no apêndice D.

A figura 16 ilustra o apoio confeccionado para o ensaio.



Figura 16 – Sistema bi apoiado confeccionado para o ensaio
Fonte: Os autores (2014).

4.3 Ensaio livre-livre

O ensaio livre-livre foi realizado visando diminuir ao máximo o fator de amortecimento gerado pelo apoio sobre os corpos de prova. O procedimento experimental segue o mesmo roteiro da norma, entretanto, ao invés de utilizar o sistema confeccionado de apoio, utilizou-se um sistema de barbante unido a dois elásticos comuns para garantir que o corpo ficasse em balanço. Os elásticos foram posicionados a 0,224 do comprimento do corpo respeitando as especificações da norma. A figura a seguir ilustra o posicionamento do acelerômetro e dos elásticos sobre o corpo de prova.

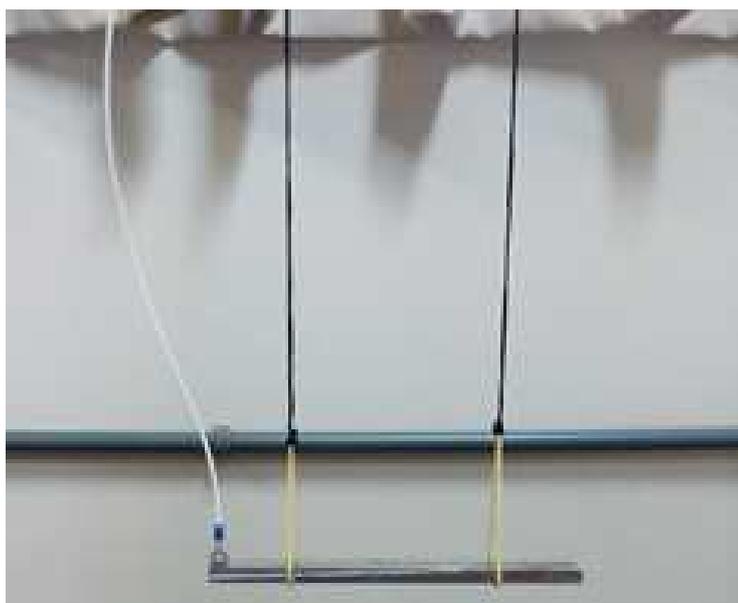


Figura 17– Ilustração do posicionamento do acelerômetro e elásticos sobre o corpo de prova.
Fonte: Os autores (2014).

Utilizamos o ferro fundido nodular como material de comparação e através dos resultados obtidos no ensaio dinâmico foi possível observar a influência dos apoios sobre o amortecimento do corpo de prova.

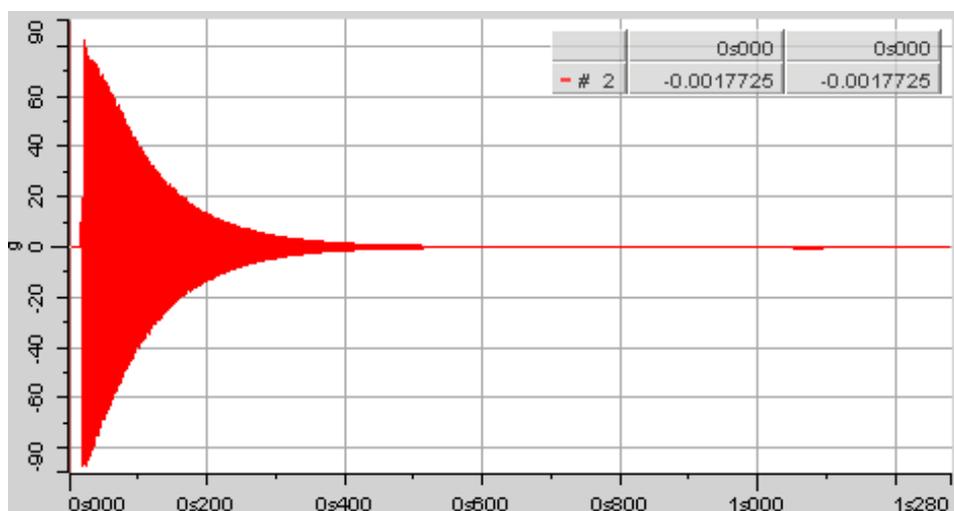


Figura 18 – Fator de amortecimento para o corpo de nodular com apoios.
Fonte: Os autores (2014).



Figura 19 – Fator de amortecimento para o corpo de nodular livre-livre.
Fonte: Os autores (2014).

Com relação a influência do apoio sobre o módulo da elasticidade, era necessário ter uma noção real do valor do módulo do material ensaiado, mas este só seria conhecido através do ensaio mecânico. Portanto só foi possível verificar que o apoio acaba alterando o fator de amortecimento (Fig. 18 e 19) e conseqüentemente a frequência resultante.

4.4 Ensaio bi apoiado

No ensaio bi apoiado o procedimento experimental segue o roteiro proposto pela norma, utilizando o sistema previamente estabelecido de apoio para os corpos de prova, como mostra a figura 20.

O sistema bi apoiado é recomendado pela norma e garante a estabilidade dos corpos de prova quando ensaiados, entretanto, pode influenciar no fator de amortecimento do corpo de prova, o que acaba prejudicando a leitura.

Os apoios também foram posicionados a 0,224 do comprimento do corpo, respeitando as especificações da norma.



Figura 20 - Corpo de prova bi apoiado.
Fonte: Os autores (2014).

Como já dito anteriormente, o método de caracterização fornecido pela norma poderia ser utilizado em matérias elásticos, homogêneos e isotrópicos. O objetivo do trabalho era justamente adequar essa metodologia para os ferros fundidos, que é um material não homogêneo e não isotrópico, visando assim caracterizar os diferentes tipos de ferros fundidos através do módulo.

A proposta foi de analisar os dois extremos, utilizando o nodular que tem características mais próximas do aço, e o cinzento que possui grandes porosidades, heterogeneidade e alto fator de amortecimento. Assim poderíamos verificar se o método seria capaz de propor resultados satisfatórios para ambos.

Utilizando as equações 1 e 3 descritas no procedimento experimental calculou-se o módulo de elasticidade dos corpos de prova, utilizando suas dimensões geométricas, sua massa e a frequência.

Os resultados para o módulo de elasticidade dos corpos de prova de ASTM-A36, nodular D5506 e cinzento G3000 estão descritos na tabela 9.

Tabela 10 – Resultados do ensaio dinâmico bi apoiado.

Teste Bi Apoiado	Módulo de elasticidade		
	SAE G3000	SAE D5506	ASTM A36
Corpo de prova 1	91,30 GPa	168,20 GPa	202,80 GPa
Corpo de prova 2	91,90 GPa	168,50 GPa	205,40 GPa
Corpo de prova 3	91,50 GPa	168,90 GPa	206,00 GPa
Média	91,56 GPa	168,53 GPa	204,73 GPa

Fonte: Os autores (2014).

Como validação dos resultados foram feitas comparações entre os valores encontrados para o módulo nos ensaios dinâmicos e aos citados no referencial teórico, como pode ser observado nos gráficos 1, 2 e 3.

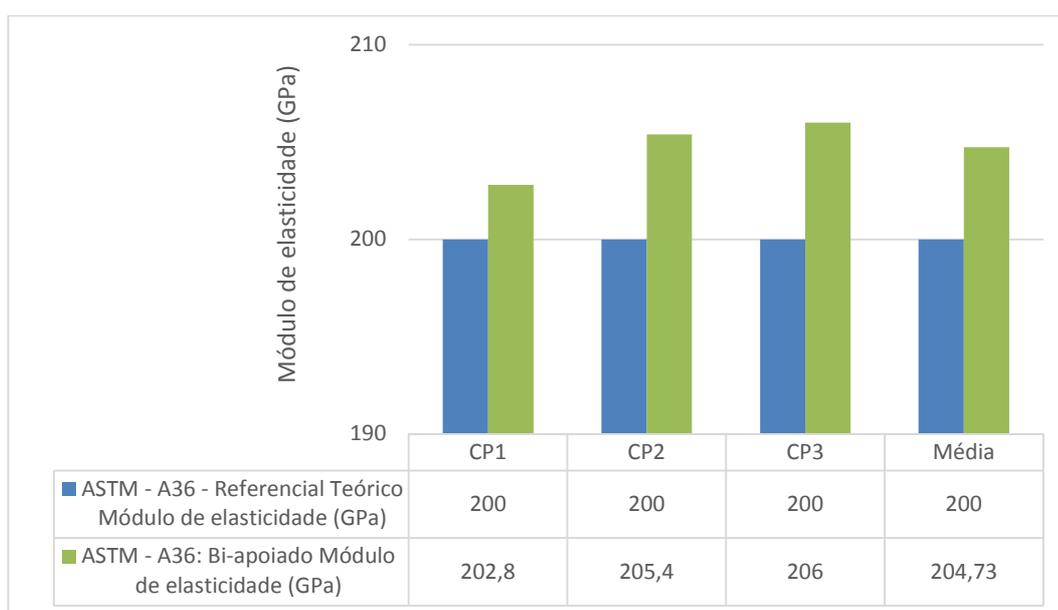


Gráfico 1 – Comparativo entre os valores do módulo de elasticidade do ASTM A36 obtido no ensaio dinâmico com os valores indicados no referencial teórico.

Fonte: Os autores (2014).

É possível verificar uma pequena variação nos valores do módulo encontrados para o aço em comparação aos valores encontrados no referencial teórico. Isso pode ser justificado pelo fato do aço não ter passado por uma retífica, causando uma certa falta de precisão dimensional e um pior acabamento nos corpos de prova. Como já

dito anteriormente, uma pequena variação na espessura, por exemplo, promove grandes alterações no módulo de elasticidade.

Por outro lado, para o cinzento e nodular que passaram pela retífica os valores encontrados para o módulo se aproximam aos valores indicados no referencial teórico, como pode ser observado nos gráficos comparativos abaixo.

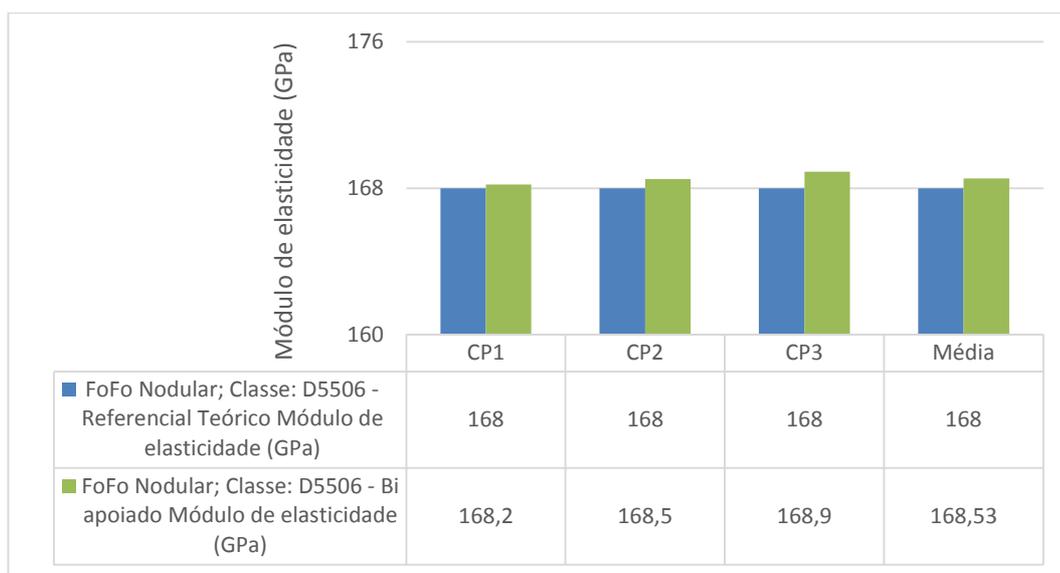


Gráfico 2 – Comparativo entre os valores do módulo de elasticidade do Nodular SAE - D5506 obtido no ensaio dinâmico com os valores indicados no referencial teórico.

Fonte: Os autores (2014).

No caso dos ferros fundidos cinzentos série G3000, o referencial teórico informa uma faixa para os valores de módulo que varia de 82-138 GPa. O valor utilizado como fator de comparação no gráfico 3 foi de 90 GPa.

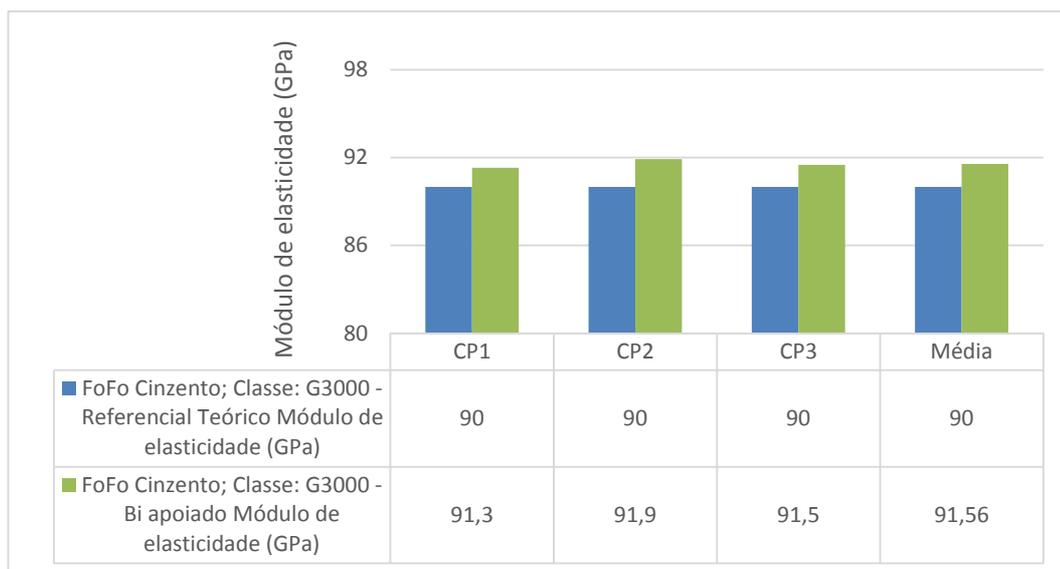


Gráfico 3 – Comparativo entre os valores do módulo de elasticidade do Cinzento SAE – G3000 obtido no ensaio dinâmico com os valores indicados no referencial teórico.

Fonte: Os autores (2014).

Um erro no cálculo do módulo pelo método de excitação por impulso não pode ser quantificado, pois a validação deste para os ferros fundidos só podia ser feita através do ensaio mecânico, que é o método mais usual e indicado. Contudo, em um comparativo entre os resultados obtidos e o referencial teórico para o módulo, indicaram que o teste pretende ser satisfatório mesmo para materiais heterogêneos e atípicos como o ferro fundido.

. Como resultado dos ensaios, obtivemos os diagramas FFT, o diagrama de coerência entre as curvas de resposta e o diagrama do amortecimento (Apêndice A).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o objetivo de aplicar a técnica de excitação por impulso para caracterizar os diferentes tipos de ferros fundidos, por meio da determinação do módulo de elasticidade, obteve-se os seguintes resultados: Para os corpos de prova do aço ASTM A36 o módulo de elasticidade obtido foi de $204,73 \text{ GPa} \pm 2 \text{ GPa}$, para os corpos de prova de ferro fundido nodular SAE J434 D5506 o módulo de elasticidade obtido foi de $168,53 \text{ GPa} \pm 0,4 \text{ GPa}$ e para os corpos de prova ferro fundido cinzento SAE J434 G3000 o módulo de elasticidade obtido foi de $91,56 \text{ GPa} \pm 0,35 \text{ GPa}$. Com base nesses resultados pode-se concluir que a utilização da técnica de excitação por impulso foi capaz de caracterizar os diferentes tipos de ferro fundido.

Não foi possível determinar o erro da técnica de excitação por impulso em relação ao ensaio de tração mecânica, pois não foi possível realizar os ensaios mecânicos nos corpos de provas caracterizados.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration. **ASTM E-1876-09**. Pennsylvania, 2013.

ANDEREUCCI, Ricardo. **Aplicação industrial ensaio por ultrassom**. ABENDE – Associação Brasileira de Ensaio não Destrutivos e Inspeção. São Paulo, 2003.

CASSOLINO, Leiliana C.; PEREIRA, Antônio H. A. **Módulos elásticos: Visão geral e Métodos de Caracterização**. Informativo Técnico Científico – ITC-ME/ATCP. São Paulo, 2010.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos**. 7 ed. - São Paulo: ABM, 1996.

COLPAERT, Hubertus. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4 ed. – São Paulo: Edgard Blücher, 2008.

FERRARINI, José L. **Caracterização de materiais para o processo de estampagem**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

GUESSER, Wilson L.; GUEDES, Luís O. **Desenvolvimento recentes em ferros fundidos aplicados a indústria automobilística**. Seminário da associação de Engenharia automotiva – AEA, São Paulo, 1997.

Disponível em: <www.tupy.com.br/downloads/guesser/desenv_ferros_fund.doc>.

Acesso em: 15 fev. 2014.

OTT, Simone M. **Efeito do molibdênio no comportamento em fadiga térmica de ferros fundidos vermiculares**. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

PAIVA, Antônio E. Macêdo. **Desenvolvimento de um equipamento para avaliar propriedades elásticas de cerâmicas refratárias a altas temperaturas pelo método de ressonância de barras**. 2002. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de São Carlos, São Paulo.

PEREIRA, Antônio H. A. et al. **Desenvolvimento de um equipamento para a caracterização não-destrutiva dos módulos elásticos de materiais cerâmicos em geral**. Paper Cerâmica 56, São Paulo, 2010.

Rio Tinto Iron & Titanium, Inc. **Ductile iron data for engineers**. Quebec, 1980.
Disponível em: < <http://www.ductile.org/didata/>>. Acesso em: 20 maio 2014.

SOEIRO, N. S. **Análise modal experimental**. Belém: 2001, 74 f. Apostila de aula do Curso de Engenharia Mecânica, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2001.

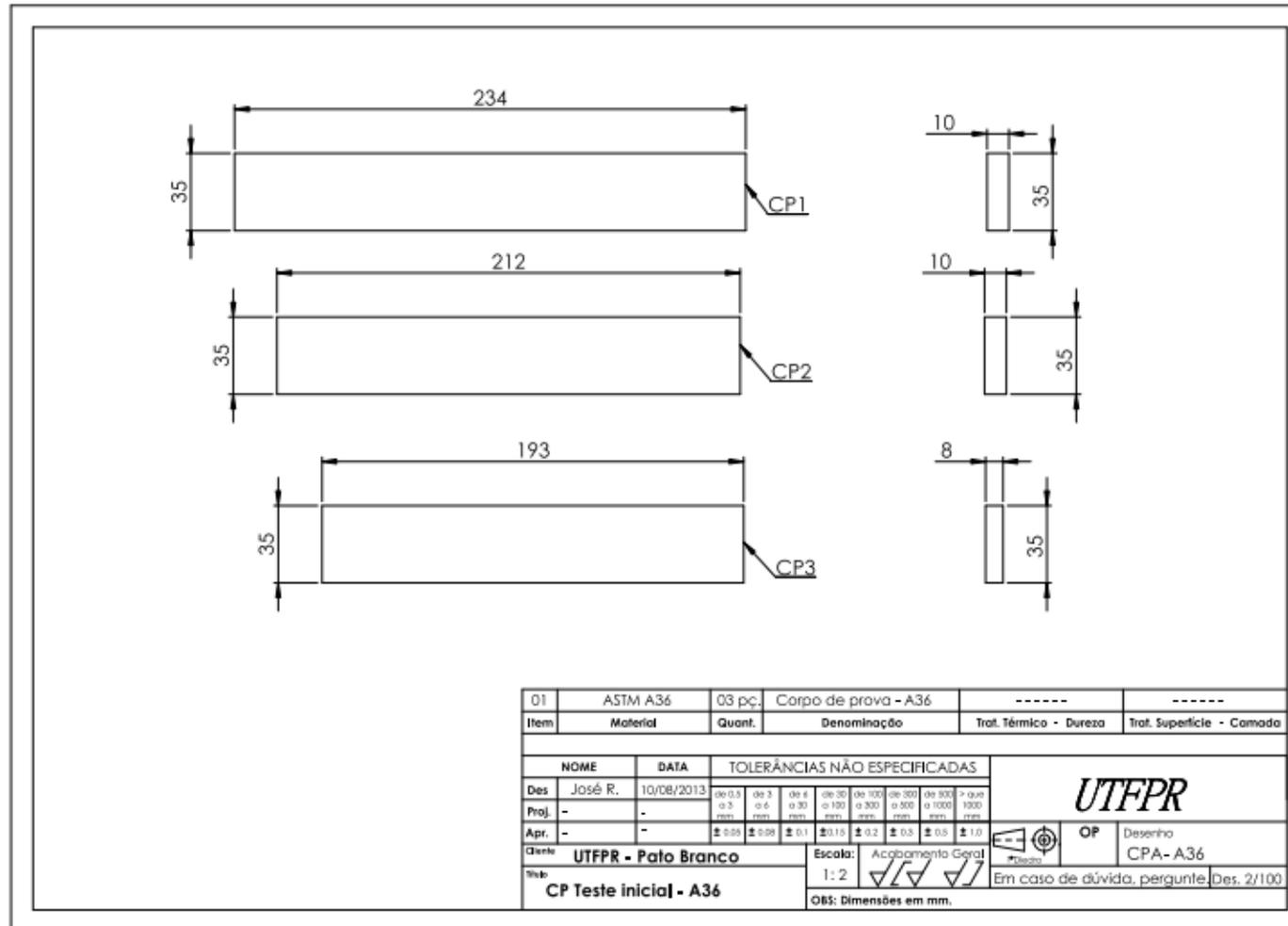
WALTON, C. F.; OPAR, T. J.; **Iron Castings Handbook** – Iron Castings Society, 1981.

VAN VLACK, L.H. **Princípios da Ciência e Tecnologia dos Materiais**, 4ª edição, Ed. Campus, 1984.

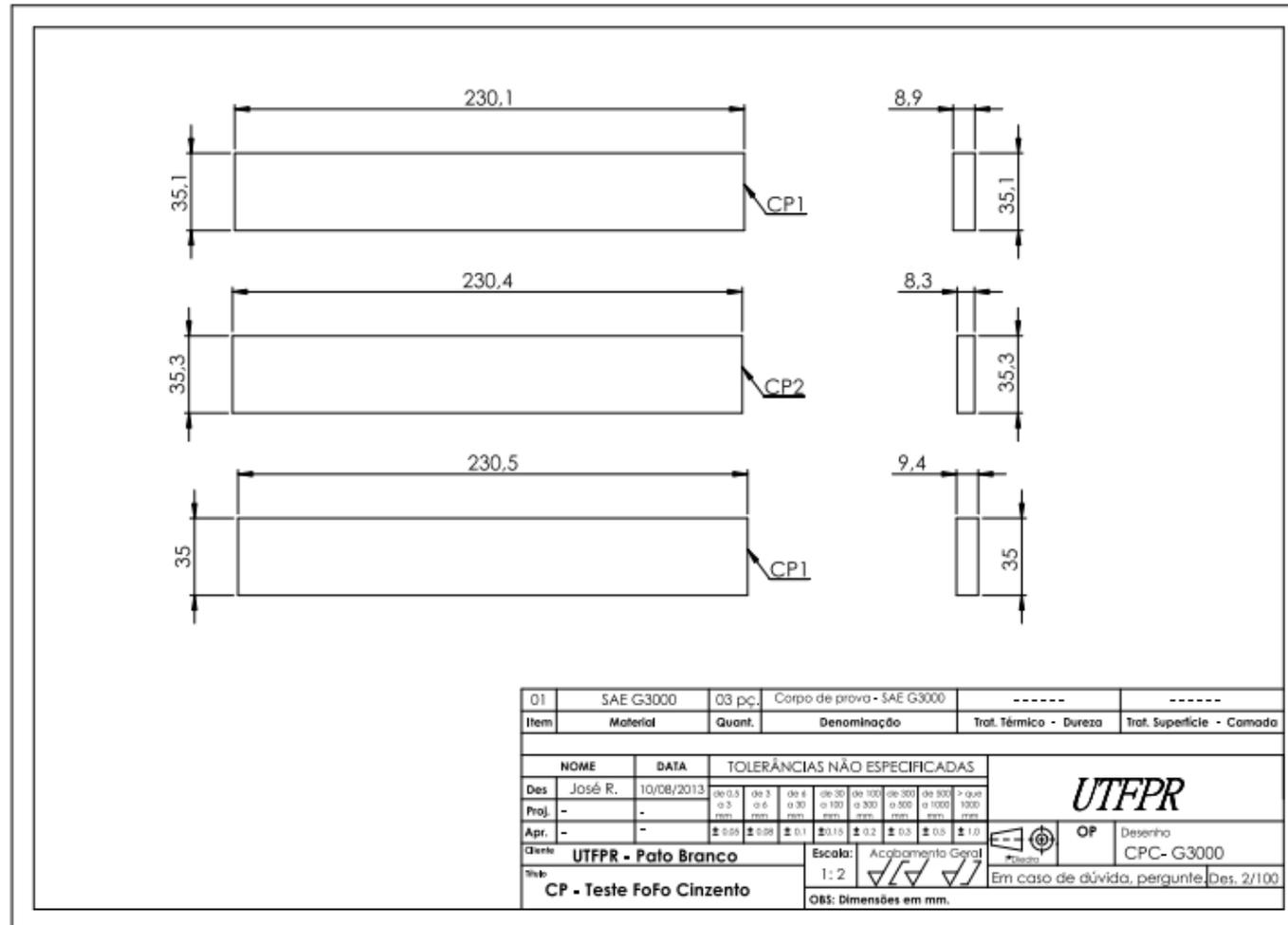
Roger L. Brockenbrough; Frederick S. Merritt. **Properties of structural steel and effects of steelmaking and fabrication**. Structural Steel Designer's Handbook, 2006.

APÊNDICES

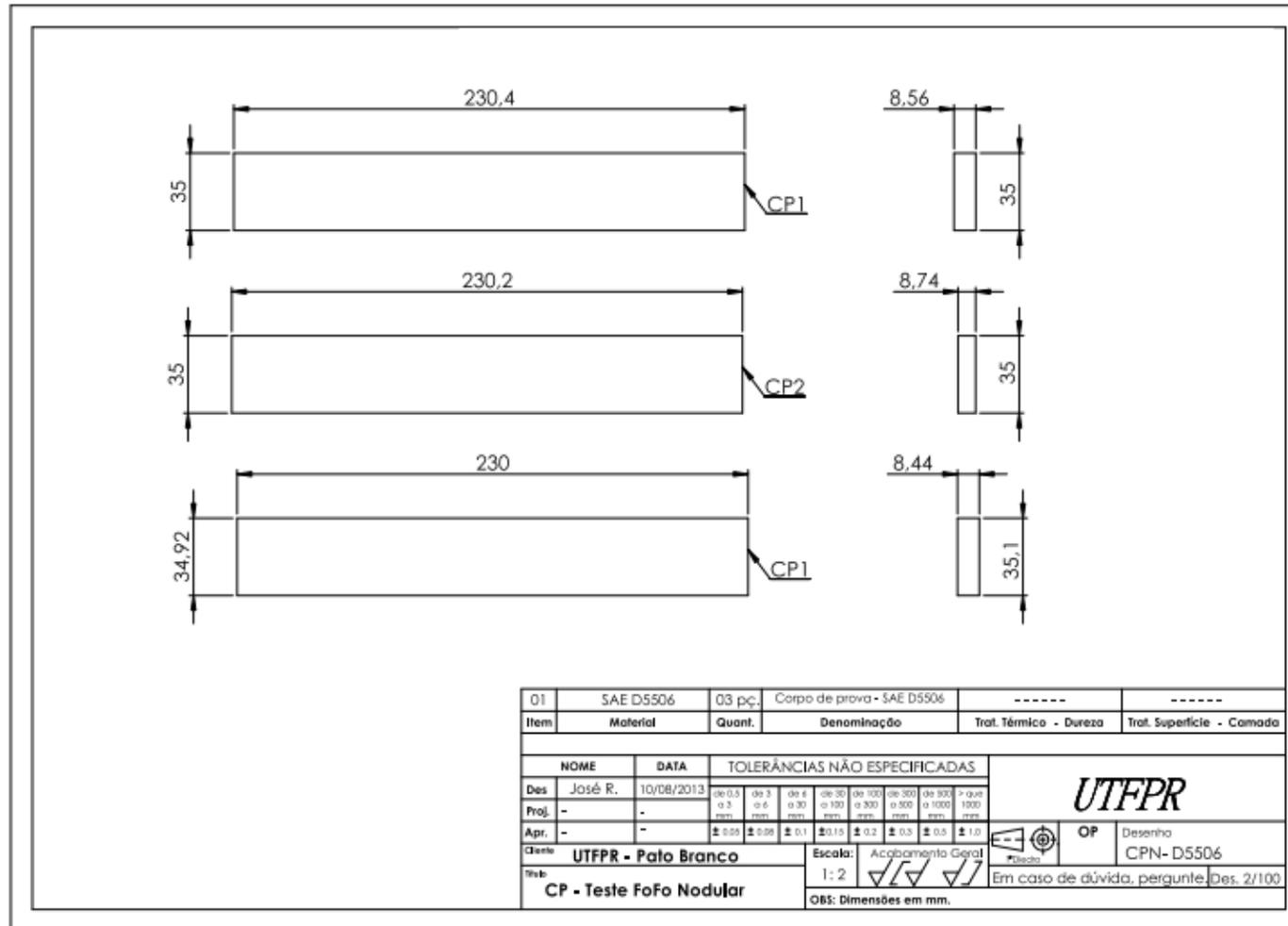
APÊNDICE A – DIMENSÕES DOS CORPOS DE PROVA ASTM A36.



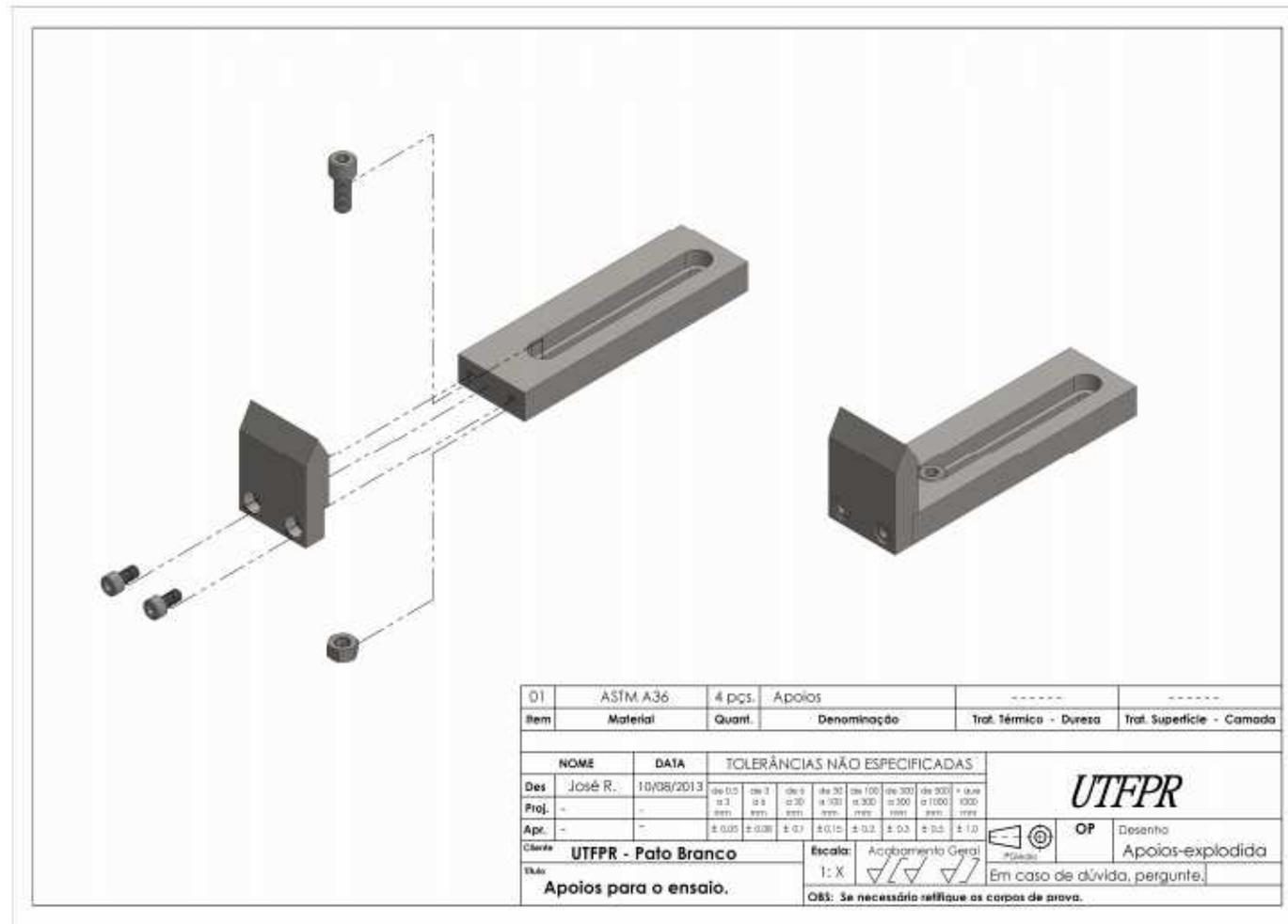
APÊNDICE B – DIMENSÕES DOS CORPOS DE PROVA SAE J434 G3000.



APÊNDICE C – DIMENSÕES DOS CORPOS DE PROVA SAE J434 D5506.



APÊNDICE D – VISTA EXPLODIDA E DIMENSÕES DO APOIO CONFECCIONADO PARA ENSAIO.



APÊNDICE E – DIAGRAMAS FFT, COERÊNCIA E AMORTECIMENTO DOS CORPOS DE PROVA.

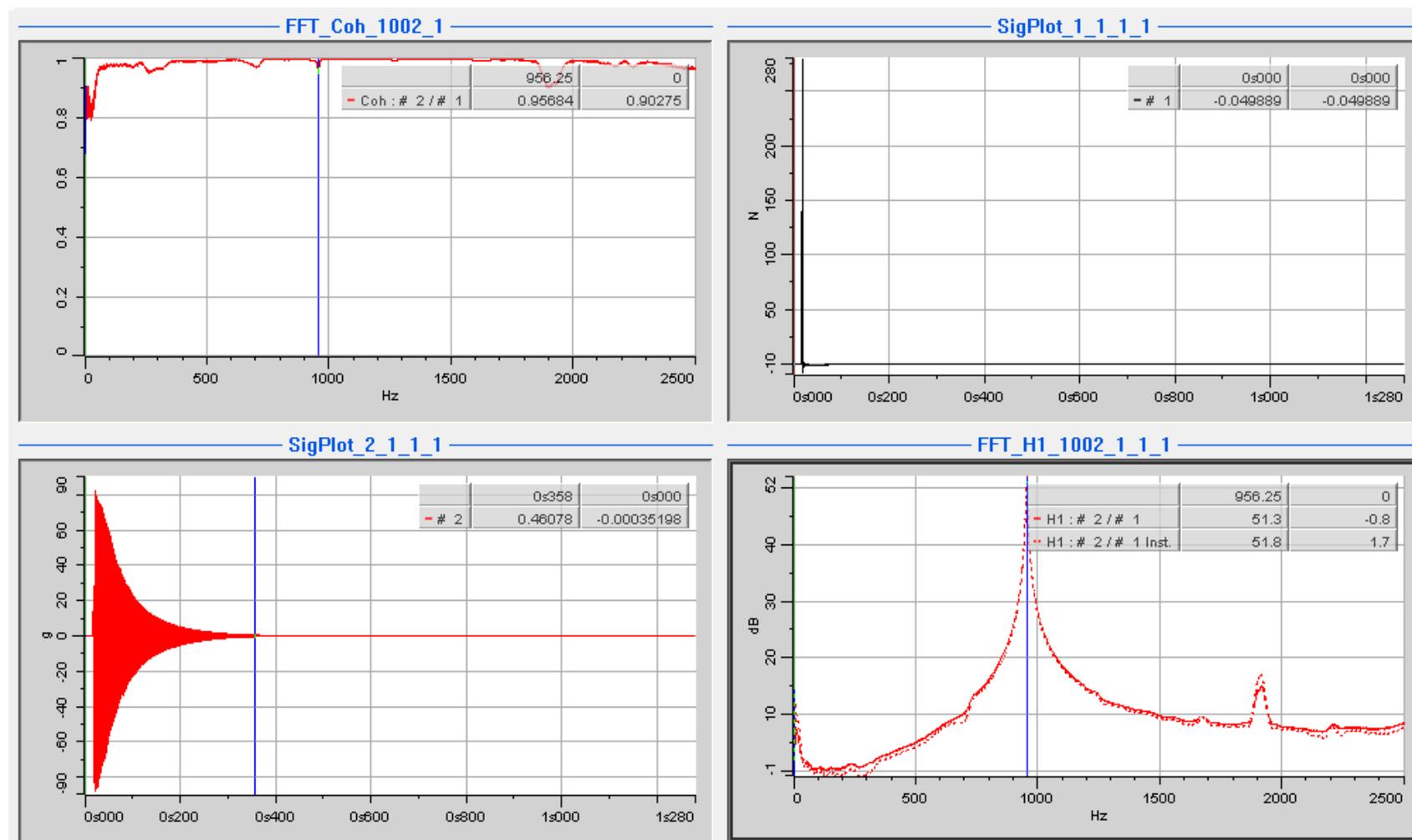


Diagrama FFT, coerência e amortecimento para ensaio livre-livre do Corpo de Prova 1, ASTM A36.

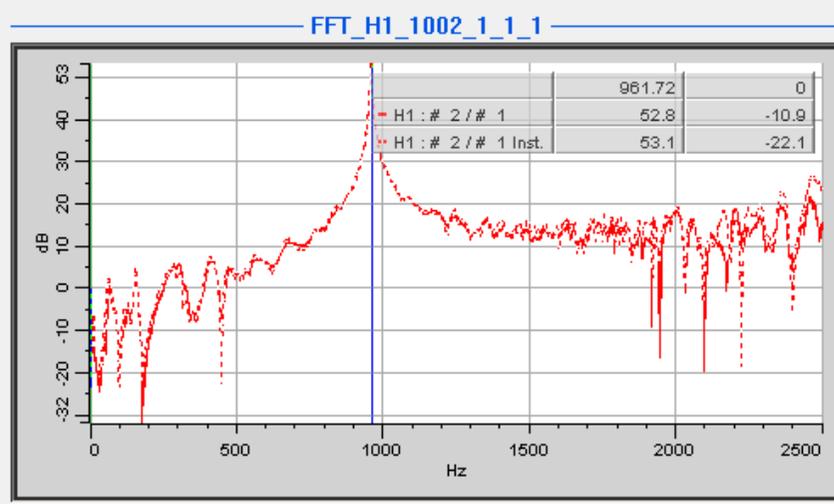
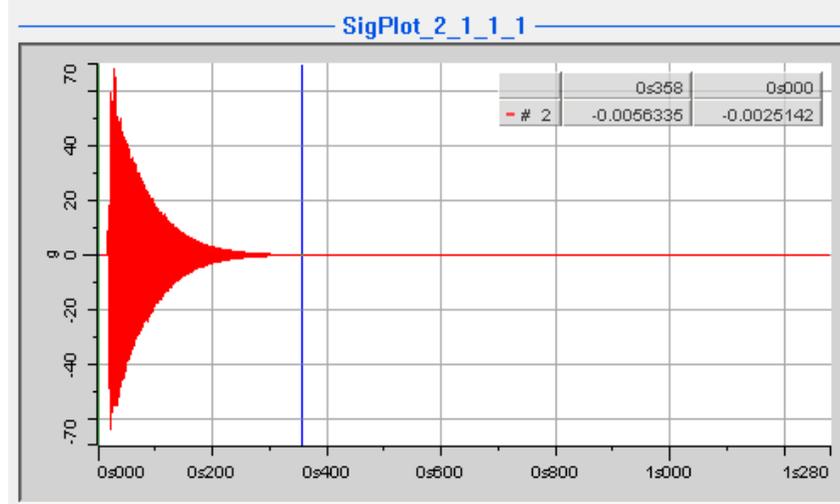
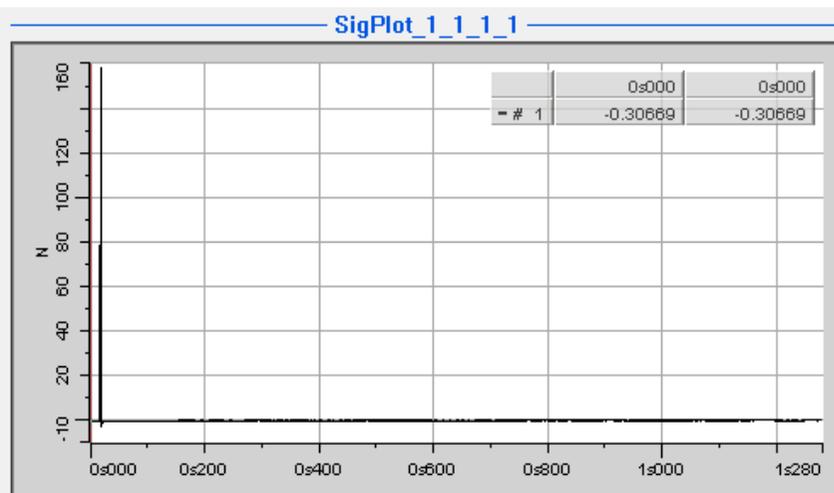
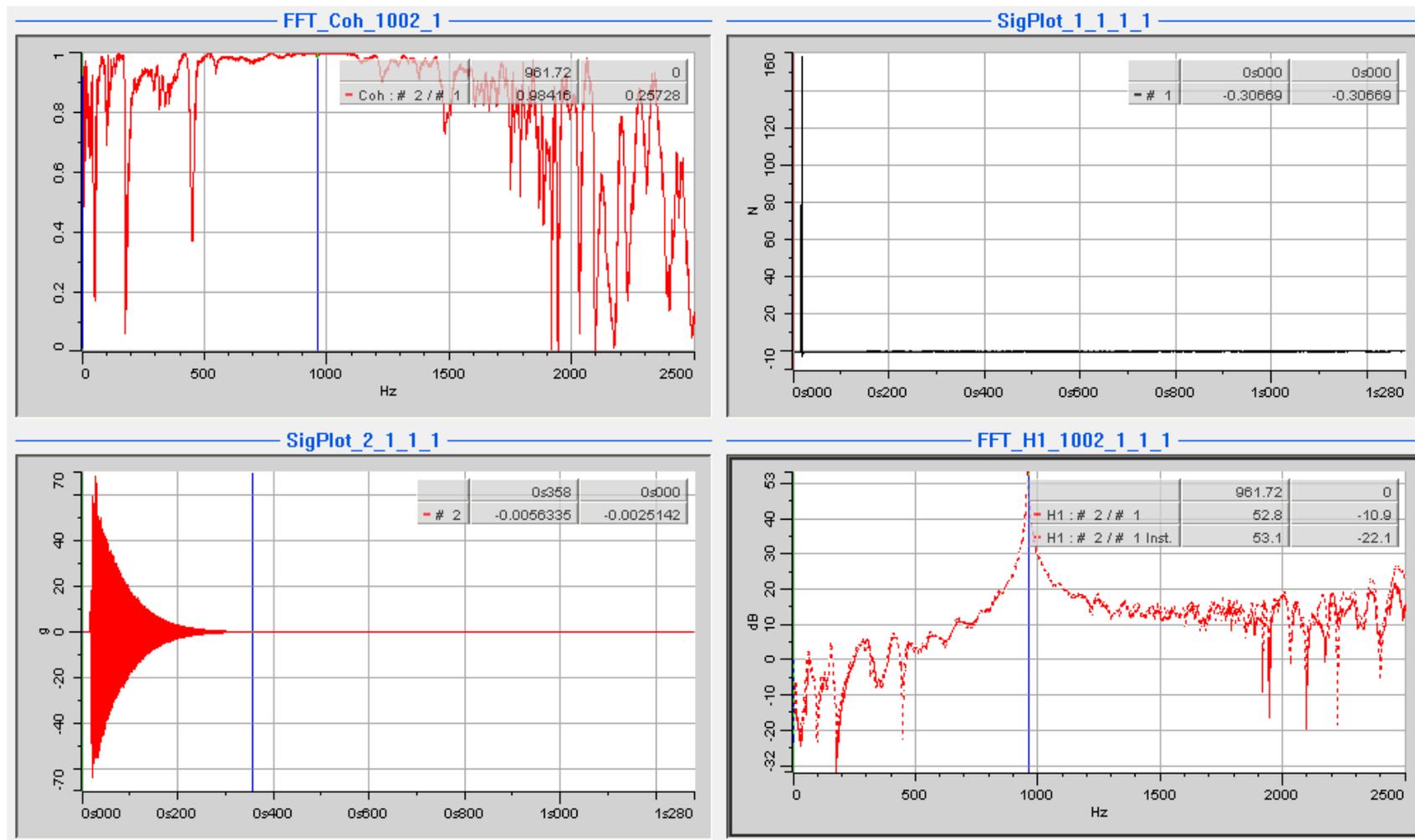


Diagrama FFT, coerência e amortecimento para ensaio bi apoiado do Corpo de Prova 1, ASTM A36.

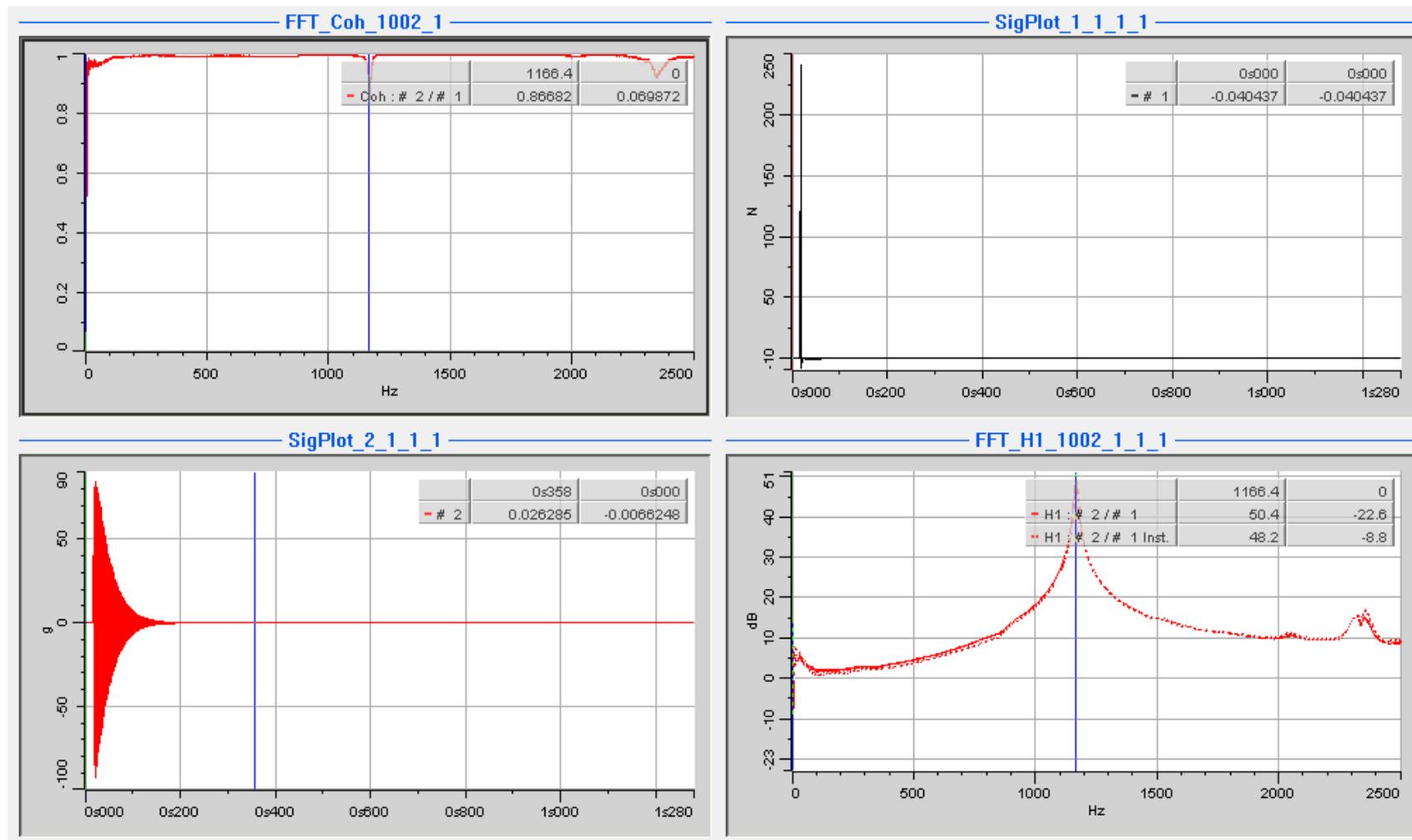


Diagrama FFT, coerência e amortecimento para ensaio livre-livre do Corpo de Prova 2, ASTM A36.

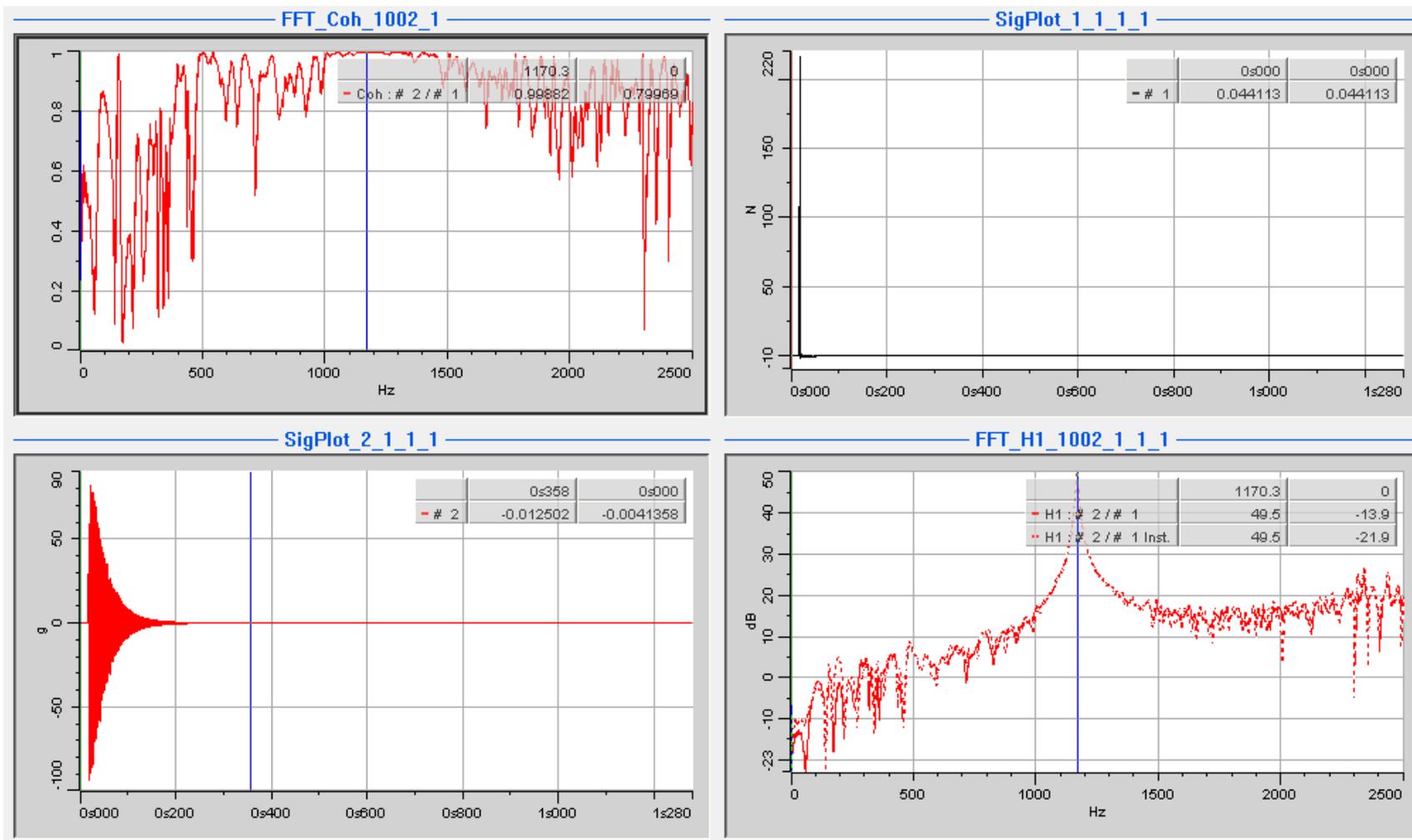


Diagrama FFT, coerência e amortecimento para ensaio bi apoiado do corpo de prova 2, ASTM A36.

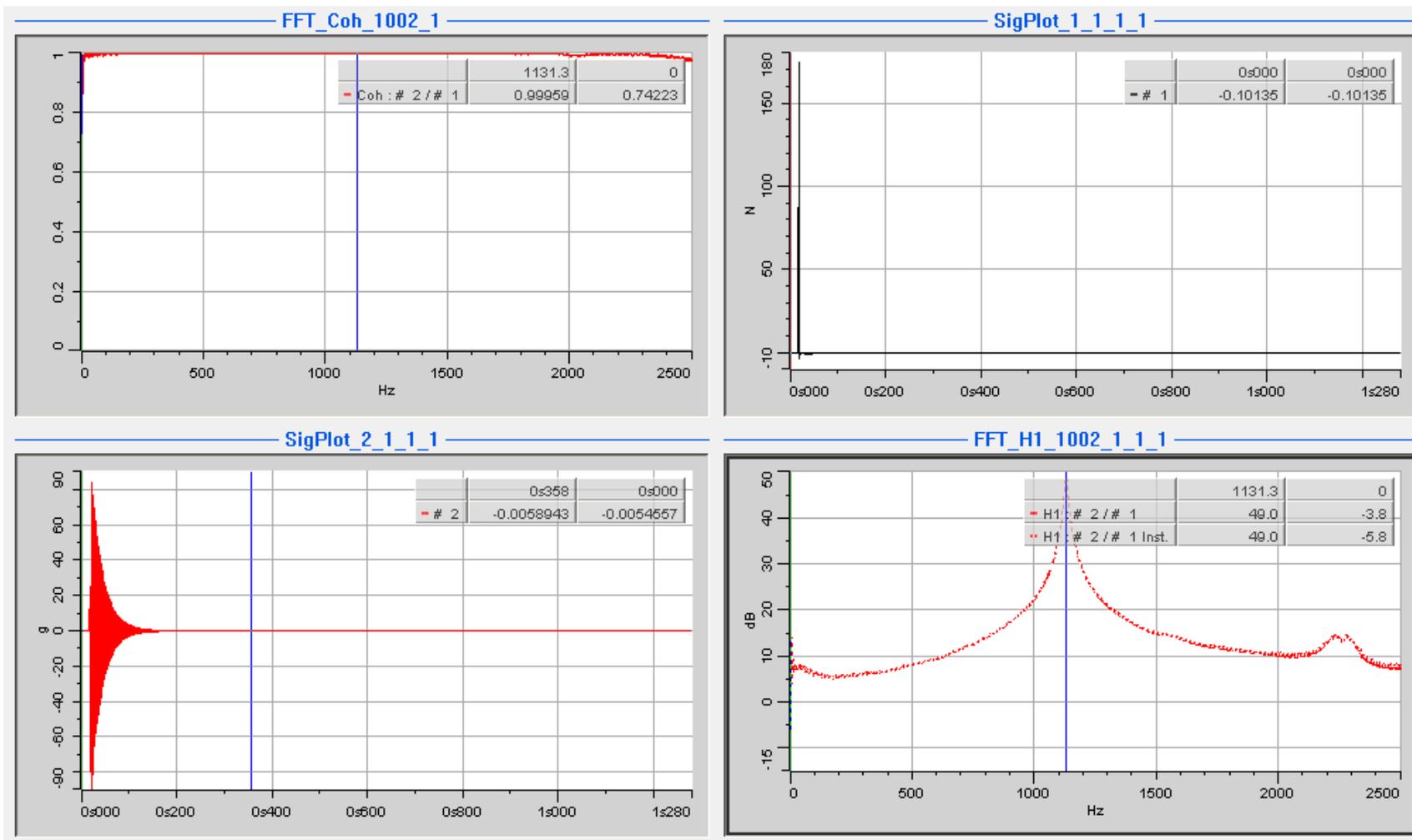


Diagrama FFT, coerência e amortecimento para ensaio livre-livre do corpo de prova 3, ASTM A36.

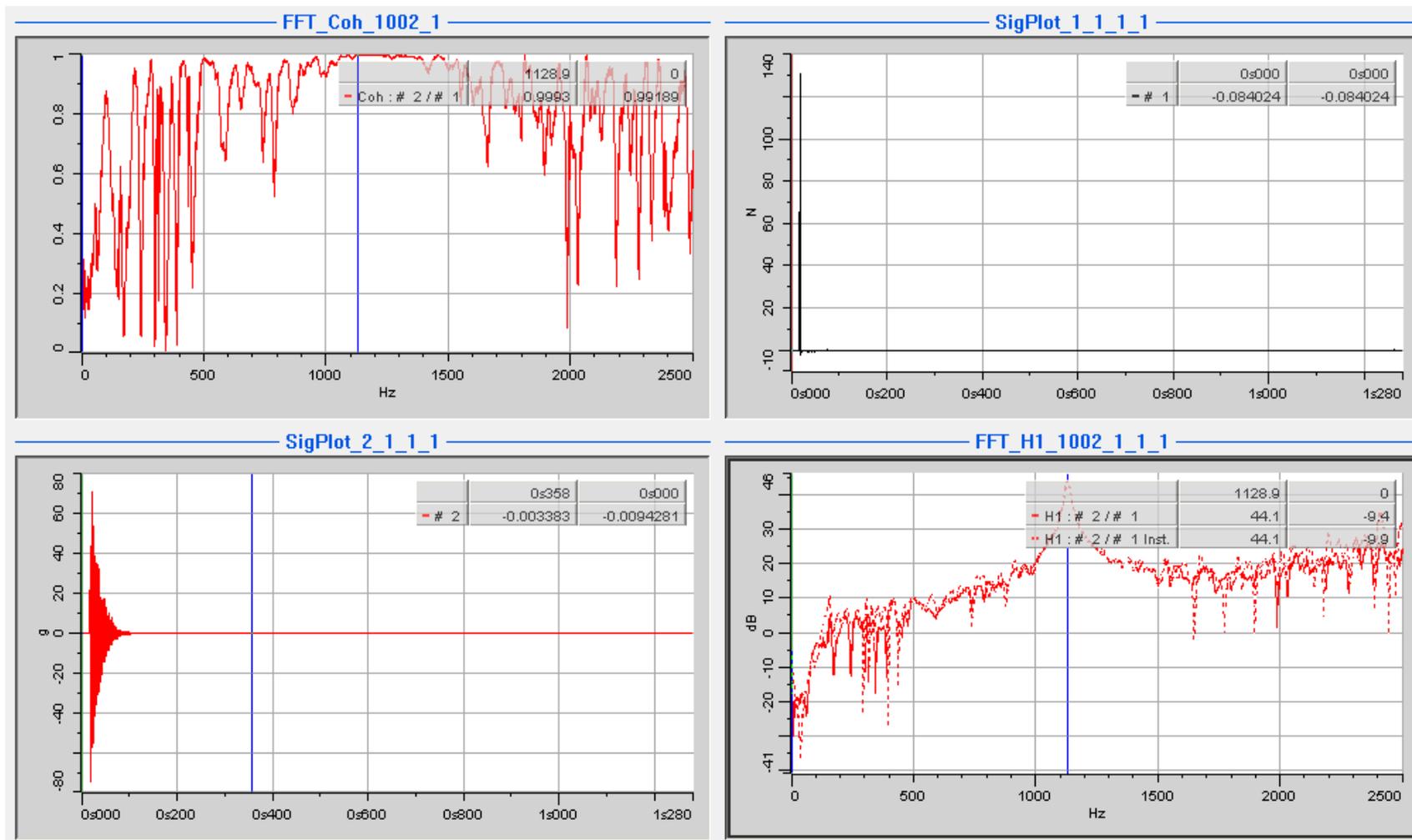


Diagrama FFT, coerência e amortecimento para ensaio bi apoiado do corpo de prova 3, ASTM A36.

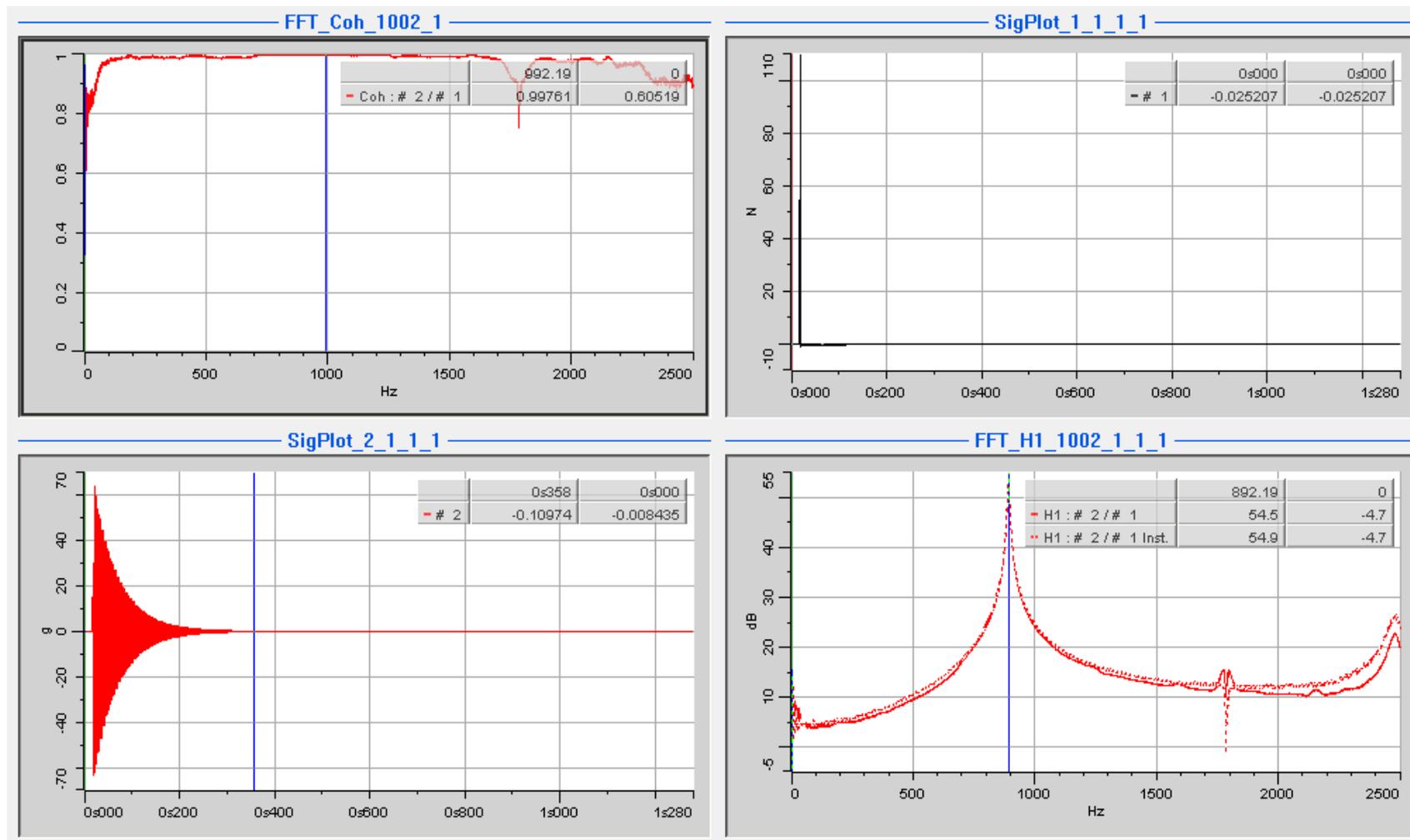


Diagrama FFT, coerência e amortecimento para ensaio livre-livre do corpo de prova 1, SAE D5506.

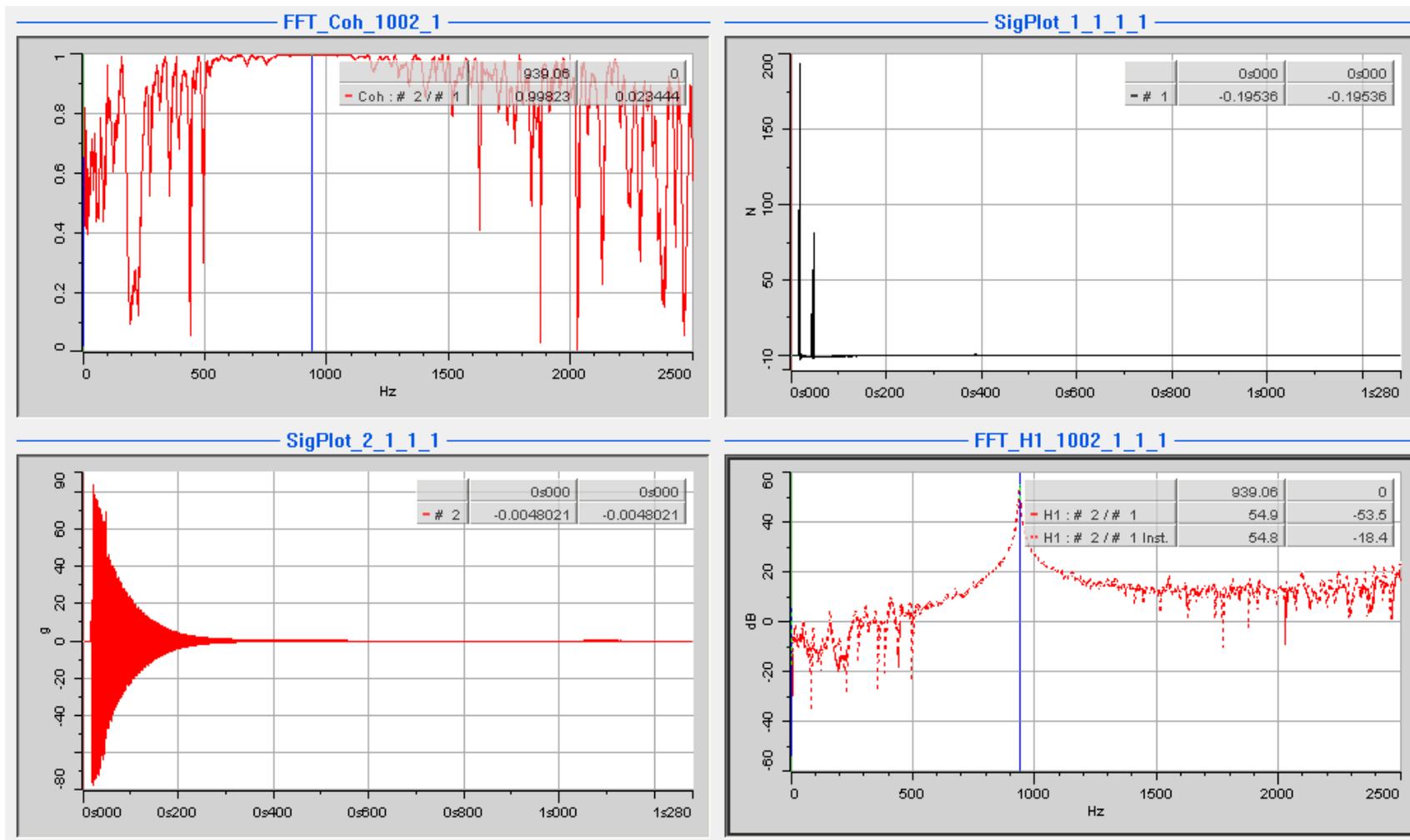


Diagrama FFT, coerência e amortecimento para ensaio bi apoiado do corpo de prova 1, SAE D5506.

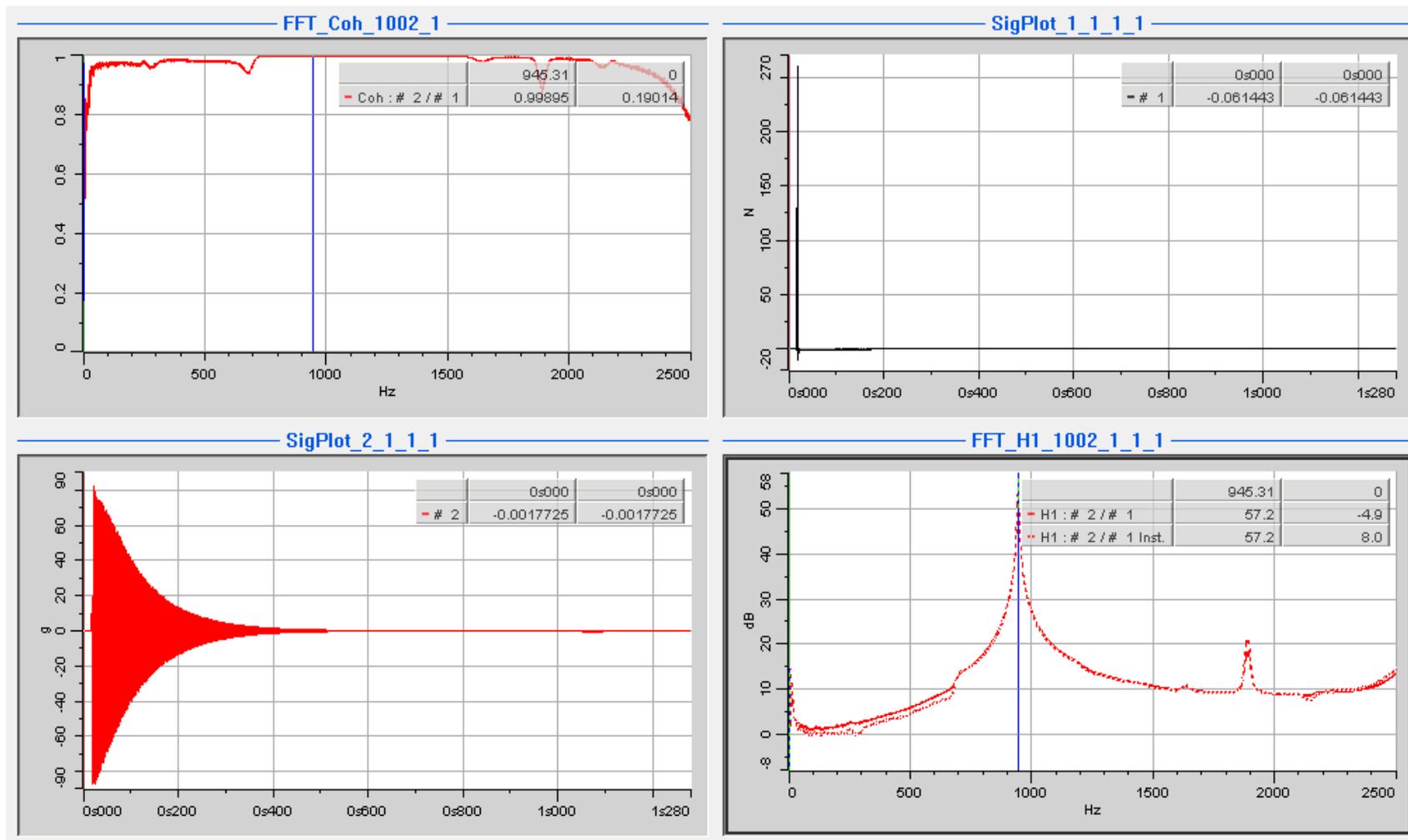


Diagrama FFT, coerência e amortecimento para ensaio livre-livre do corpo de prova 2, SAE D5506.

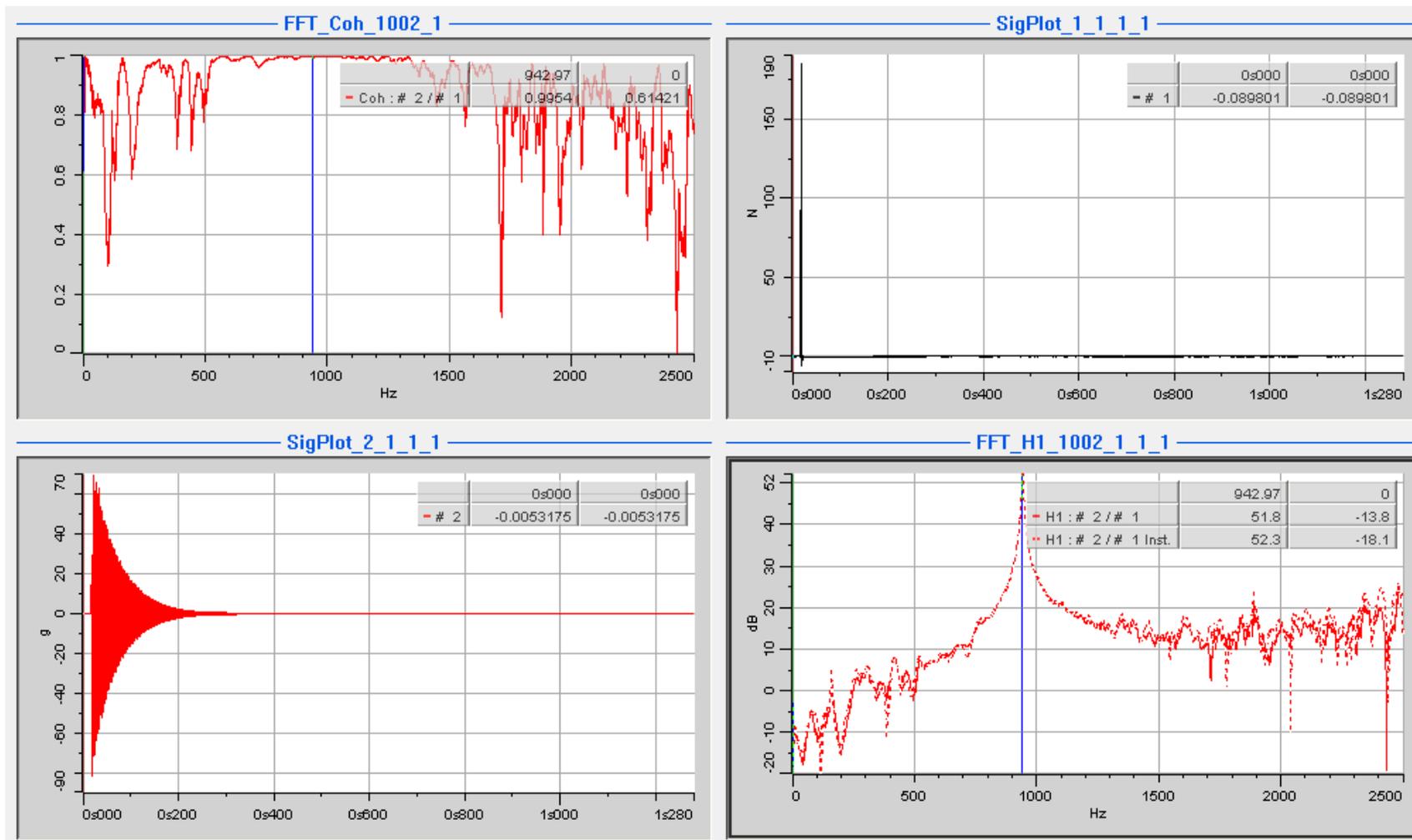


Diagrama FFT, coerência e amortecimento para ensaio bi apoiado do corpo de prova 2, SAE D5506.

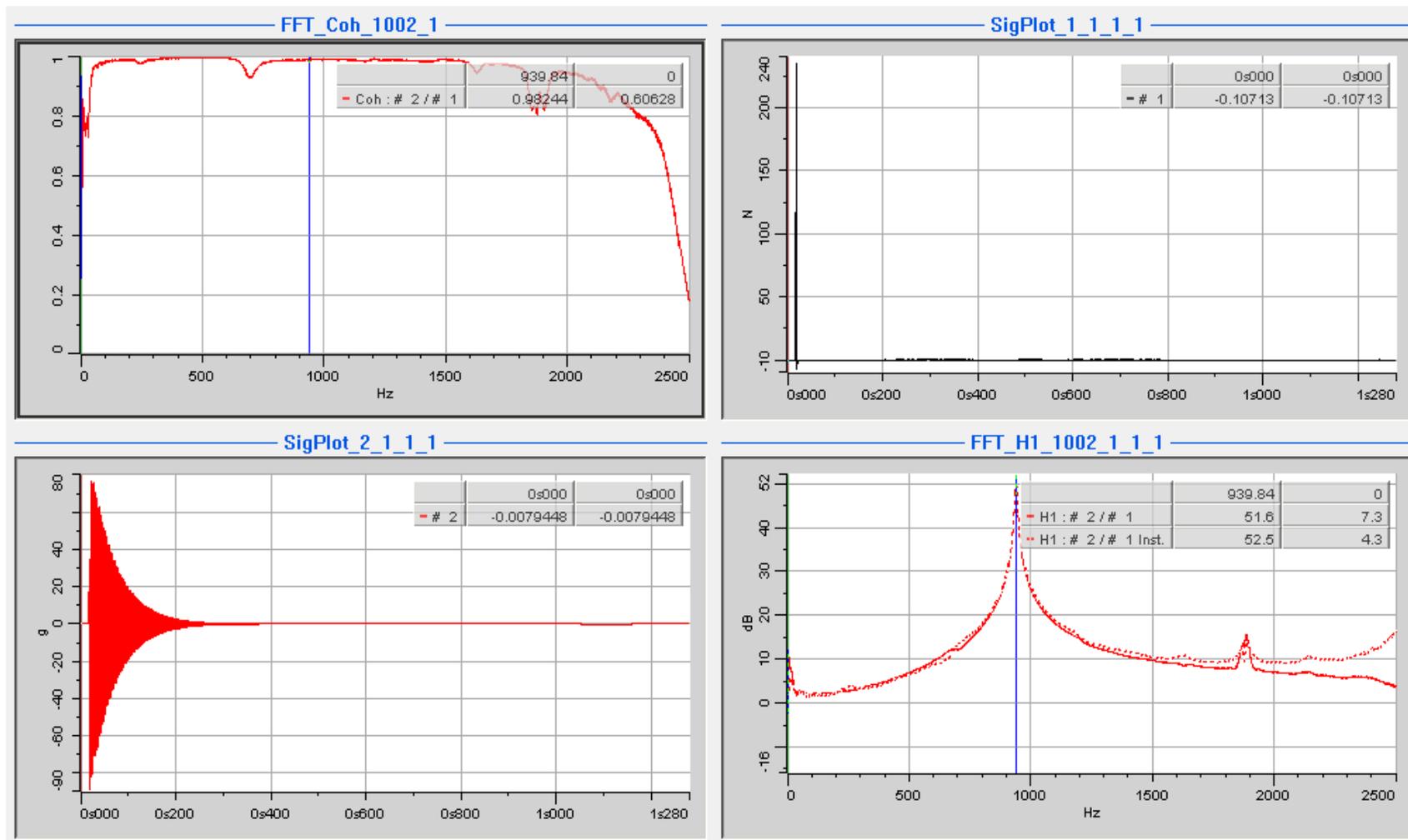


Diagrama FFT, coerência e amortecimento para ensaio livre-livre do corpo de prova 3, SAE D5506.

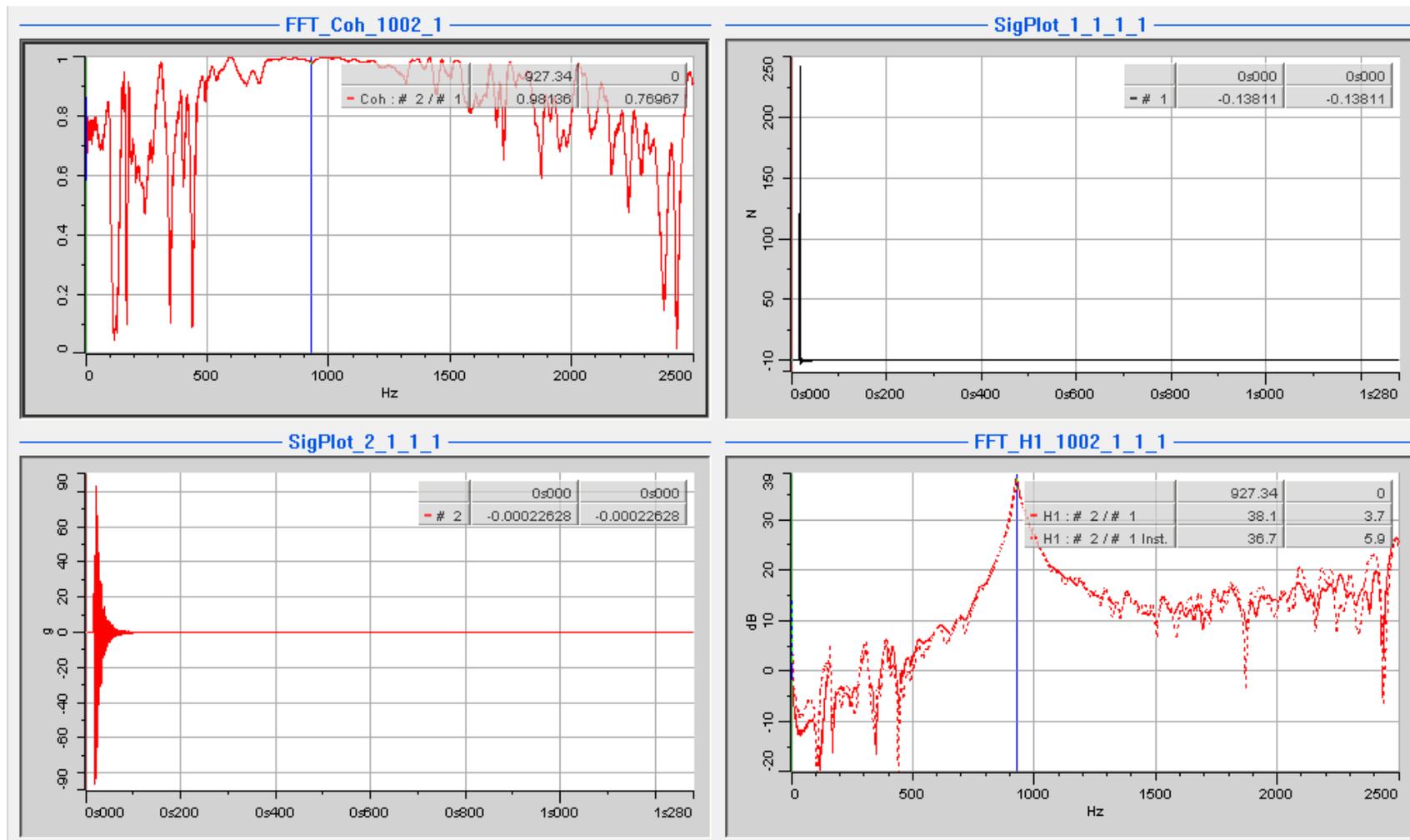


Diagrama FFT, coerência e amortecimento para ensaio bi apoiado do corpo de prova 3, SAE D5506.