0

1. IMPLEMENTAÇÃO DE METODOLOGIA DE ANÁLISE NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA
   1. Apresentação

Este relatório tem por objetivo apresentar o andamento da atividade intitulada “Implementação da metodologia de análise no domínio da frequência”, apontando pontos específicos de estudo que devem ser trabalhados para a conclusão da atividade, assim como a apresentação dos principais resultados.

A princípio, estudou-se acerca da análise dinâmica por ser imprescindível na avaliação de linhas de ancoragem e *risers*. Os estudos posteriores permitiram entender a formulação de linearização proposta por Krolikowski e Gay para os possíveis casos de ação de onda. Tal linearização é verificada com a resposta não linear obtida por meio do *framework* DOOLINES, permitindo aferir que a linearização da parcela de arrasto na formulação de Morison apresenta bons resultados.

Em seguida, estuda-se sobre a cinemática de onda no domínio da frequência, considerando ondas regulares e irregulares, assumindo a teoria linear de Airy.

No relatório em pauta, apresenta-se o procedimento de análise dinâmica no domínio da frequência e realiza-se a aplicação por meio da resolução de um sistema com um grau de liberdade.

* 1. Introdução
     1. Análise dinâmica

As estruturas são sistemas sujeitos a ações externas, que no caso de estruturas offshore podem-se citar as ondas, a correnteza, o vento, a pressão hidrostática, etc. As ações externas podem variar (em posição, direção, sentido e magnitude) com o tempo, podendo provocar forças de inércia relevantes. O estudo do efeito e da relevância destas ações é chamado de análise dinâmica, utilizada para o adequado dimensionamento dos componentes estruturais.

As simulações dinâmicas de linhas de ancoragem ou risers podem ser realizadas no domínio do tempo ou no domínio da frequência. Segundo Clough (1995), apesar da análise no domínio do tempo poder ser utilizada para determinar a resposta de qualquer sistema sujeito a um carregamento arbitrário, podem ocorrer casos em que seja mais conveniente realizar uma análise no domínio da frequência. Por exemplo, nos casos em que os parâmetros que compõem a equação de movimento sejam dependentes da frequência, como o coeficiente de rigidez, ou o coeficiente de amortecimento, nestes convêm o uso da análise no domínio da frequência. De forma geral, pode-se afirmar que a análise dinâmica linear de um sistema discreto, independente do domínio de análise, busca a solução da equação do movimento, dada por

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (1) |

sendo a matriz de massa, a matriz de amortecimento, a matriz de rigidez e o vetor de forças externas. Os vetores , , são formados, respectivamente, pelos componentes de deslocamento, velocidade e aceleração associados aos graus de liberdade do modelo discreto.

As estruturas offshore como *risers* e linhas de ancoragem encontram-se em contato direto com as ondas oceânicas e, consequentemente, devem resistir aos esforços gerados pela ação das ondas. Para se avaliar tais estruturas, faz-se uso de análises dinâmicas, que podem ser no domínio do tempo, na qual as solicitações são dadas em função do tempo, e no domínio da frequência, na qual as solicitações são dadas com espectros de frequência.

A análise no domínio da frequência possui como limitação a necessidade das parcelas que compõem a equação de movimento serem lineares, o que vem a ser um incômodo em casos de efeitos não lineares como o da força de arrasto e do amortecimento, casos em que a geometria varia com o tempo, casos em que a superfície de elevação é variável. Entretanto, em muitas situações, essa não linearidade pode ser satisfatoriamente linearizada.

Na norma DNVGL-RP-C205 (2017) registra-se que a análise no domínio da frequência é vastamente utilizada na análise de unidades flutuantes, podendo avaliar tanto o movimento da estrutura quanto as forças que atuam sobre a mesma. Possui grande aplicabilidade na análise de fadiga e análise de estruturas sujeitas a condições ambientais moderadas, situações essas em que a linearização apresenta resultados satisfatórios. A análise no domínio da frequência também possui a vantagem de que a análise computacional é relativamente simples e eficiente quando comparada com a análise no domínio do tempo.

* + 1. Obtenção das matrizes de massa, rigidez e amortecimento

Para a realização de uma análise dinâmica de estruturas tem-se a necessidade da construção das matrizes de massa, rigidez e amortecimento.

* Matriz de rigidez

Considerando-se os elementos estruturais do tipo barra, respondendo apenas a solicitações axiais, a rigidez axial é dependente da área da seção transversal (), do módulo de elasticidade longitudinal () e do comprimento (), assumindo-se a expressão , cuja construção pode ser visualizada na Figura 1.

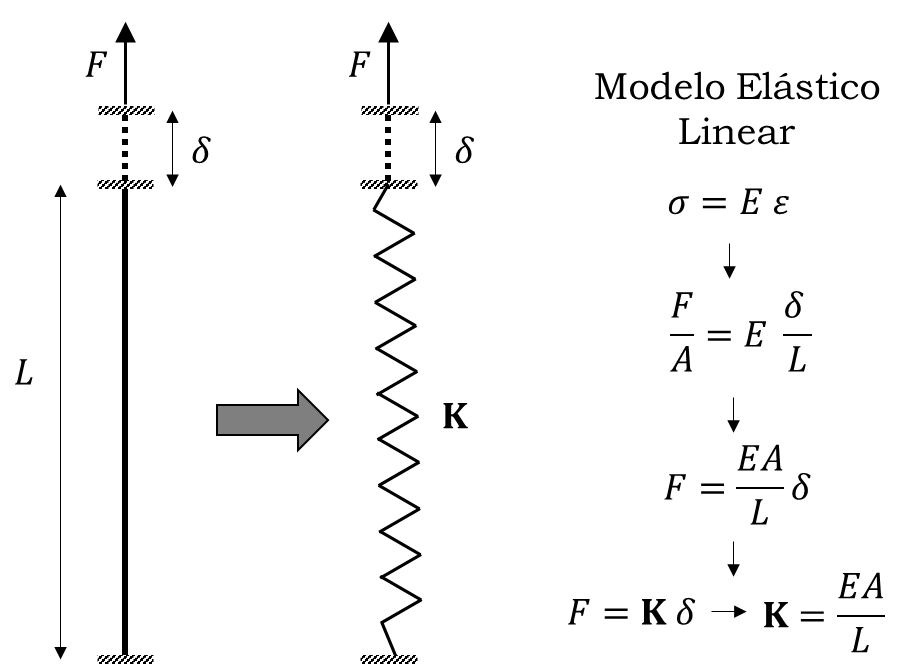


Figura 1 - A rigidez axial do elemento de barra.

Para um elemento com rigidez axial igual a , por meio de transformações lineares, é possível obter a informação de rigidez do elemento no sistema global de referência, sendo esta dada por uma matriz que para o seu cálculo é necessária a informação de inclinação do elemento em relação ao eixo x positivo do sistema global, que por comodidade é considerado como sendo igual ao sistema de eixos cartesianos. A Figura 2 apresenta os sistemas de referência que são considerados durante o processo de cálculo da matriz de rigidez do elemento.

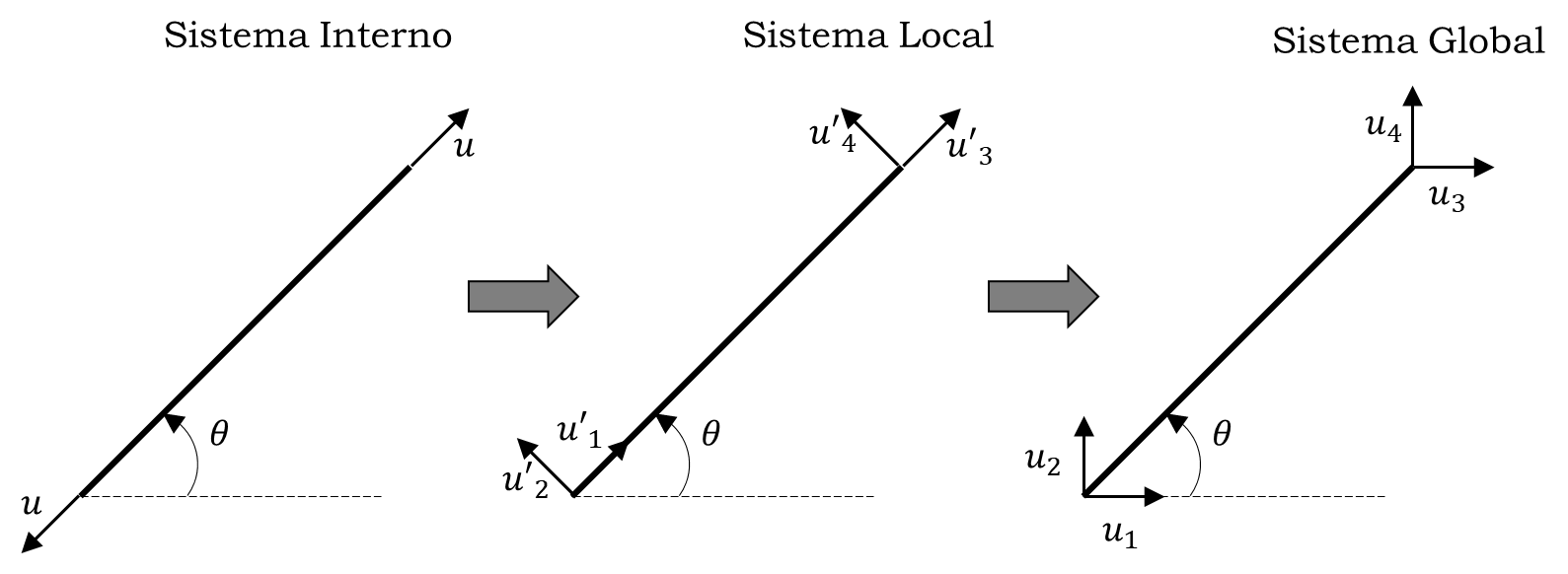


Figura 2 - Sistemas de referência para o elemento de barra considerado.

Sendo assim, a matriz de rigidez de um elemento de barra no sistema global é dada por

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (2) |

* Matriz de massa

A matriz de massa permite representar os coeficientes de força de inércia que surgem durante o processo de análise dinâmica, podendo ser expressa de duas maneiras, a saber: matriz de massa consistente e matriz de massa concentrada. Estas, por sua vez, dependem da densidade da barra (), da área de sua seção transversal () e de seu comprimento ().

Para uma barra qualquer no plano, a matriz de massa consistente é dada por

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (3) |

e representa a matriz da forma quadrática associada à energia cinética do sistema discreto. Por se tratar de uma matriz não diagonal, muitas vezes, visando-se alguma eficiência computacional no processo de integração das equações de movimento do sistema discreto, faz-se uso da matriz de massa concentrada, que é dada por

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (4) |

e essa é calculada considerando-se que metade da massa total do elemento é concentrada em cada nó da barra, fazendo com que essa matriz se apresente na forma diagonal.

* Matriz de amortecimento

O amortecimento constitui-se de um conjunto de mecanismos que provocam dissipação de energia, a qual se encontra presente em todo sistema mecânico oscilatório de modo que provoca o decaimento da vibração, sendo útil em casos de vibração indesejável e em estruturas com situação próxima da ressonância. O amortecimento pode ser resultante das características da estrutura, como o fenômeno de histerese do material e movimentos de superfícies de contato, ou do meio circundante, como paredes, divisórias, ar, água e outros dispositivos de dissipação de energia.

A dissipação de energia é um processo muito complexo resultante de diversas causas e dependente da estrutura, do meio circundante e das amplitudes das oscilações e, além disto, pode apresentar interações com os vínculos de apoio de tal maneira que não apresente uniformidade ao longo da estrutura. Pode ainda depender da forma da estrutura e do carregamento, chegando a até apresentar efeito negativo e intensificar a vibração. Por tais motivos o amortecimento é estimado por meio de experimentos físicos, utilizando em sua maioria a simplificação de considerá-lo como amortecimento do tipo viscoso. Esse tipo de amortecimento pode ser exemplificado pelo movimento de um corpo sólido mergulhado em um fluido, sendo tratado matematicamente desta forma, e com isto poder se utilizar dos métodos do decremento logarítmico, da meia amplitude e da largura de banda, e com isto se calcular o amortecimento.

Segundo Vaz (2010), o amortecimento é convenientemente representado como sendo uma combinação linear de e na forma

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (5) |

sendo o coeficiente de massa proporcional e o coeficiente de rigidez proporcional. Esta forma de representação é também denominada de amortecimento de Rayleigh, ou amortecimento proporcional, e possui a vantagem de ser ortogonalizável uma vez que as matrizes de massa e de rigidez também possuem esta característica.

A determinação dos coeficientes e pode ser realizada pela solução do sistema de equações dado por

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (6) |

sendo e as razões de amortecimento para o i‑ésimo e para o j‑ésimo modos de vibração, mas vale ressaltar que é usual considerar a mesma razão de amortecimento para os diferentes modos de vibração. Sendo também e as frequências naturais para o i‑ésimo e para o j‑ésimo modos de vibração respectivamente. A escolha do valor para a razão de amortecimento define se o amortecimento é subcrítico (), não oscilatório (), ou supercrítico (). Considerando as duas primeiras frequências naturais e os coeficientes e são calculados por

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (7) |

* + 1. Teoria de onda

As ondas oceânicas são formadas pela influência dos ventos sobre os oceanos, o qual existe uma transferência de energia provinda dos ventos e transmitida para a superfície da água, consequentemente formando as ondas. O escoamento turbulento do ar provoca uma grande variação das tensões de cisalhamento e do campo de pressões quando se aproxima da superfície do mar, com isto as ondas podem ser intensificadas a depender da fase do vento ou outros fatores.

Segundo Costa (2008), os modelos para descrição do comportamento de ondas podem ser classificados de acordo com teorias de ondas regulares e irregulares, também conhecidas como ondas determinísticas e aleatórias. As ondas regulares possuem comportamento bem definido no tempo e no espaço, com características que não variam com o tempo, para a sua representação faz-se uso de funções matemáticas que utilizam parâmetros invariáveis da onda como período de onda, comprimento de onda e amplitude.

Como esperado, para a representação de ondas oceânicas que apresentam comportamento aleatório têm-se uma dificuldade matemática superior. Para a representação dessas ondas utiliza-se a superposição de diferentes ondas regulares com distintos parâmetros de onda (altura, período, frequência, fase), podendo, então, fazer-se uso de teorias determinísticas para as ondar regulares (Chakrabarti, 2005).

Diversas são as teorias de onda formuladas ao longo dos anos, destacando-se a Teoria linear de Airy, a Teoria não linear de Stokes, a Teoria Cnoidal e a onda Solitária, a diferença visual entre elas pode ser analisada por meio da Figura 3.

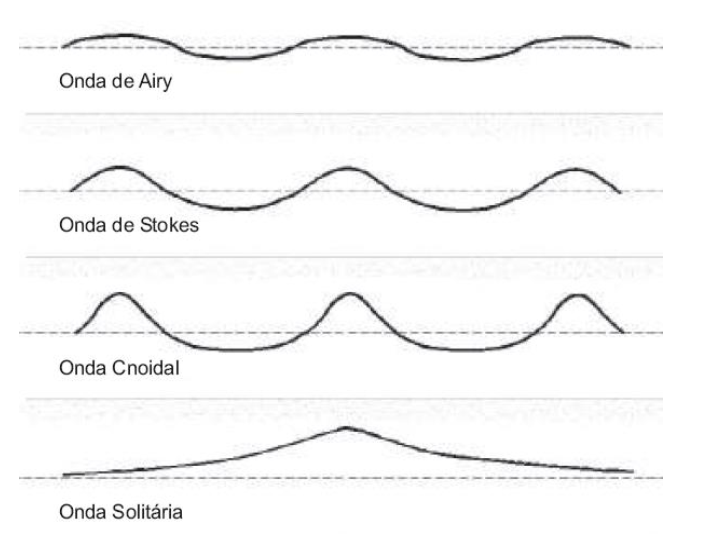


Figura 3 - Sistemas de referência para o elemento de barra considerado.

A escolha da teoria de onda a ser utilizada depende de três parâmetros da onda que são a altura (), período (), e profundidade da lâmina de água (), com estes estabelecem-se intervalos de aplicação das diversas teorias de onda como indicado na Figura 4.

A teoria linear de Airy é considerada a mais simples e mais utilizada de todas as teorias de ondas, trata-se de uma teoria de amplitude pequena, ou seja, a altura da onda é pequena comparada ao comprimento da mesma ou à profundidade da água (Chakrabarti, 2005). O campo de aplicação da teoria linear de Airy permite desprezar os termos de ordem superior presentes nas equações que governam as condições de contorno, sendo assim tal teoria consiste em uma linearização.

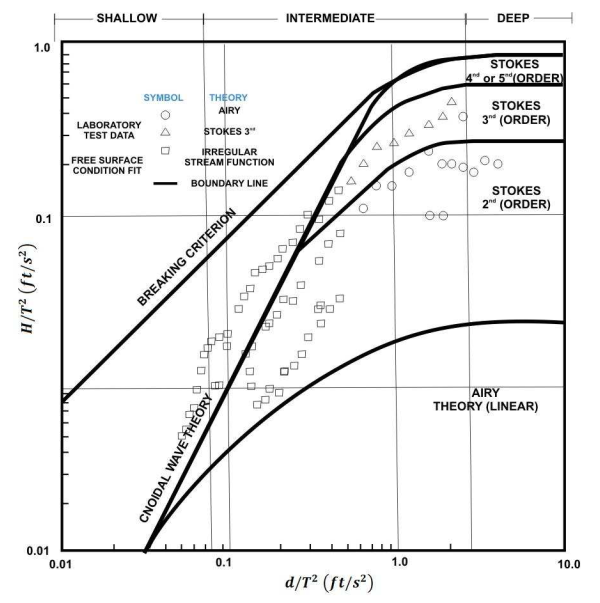


Figura 4 – Ábaco para escolha da teoria de onda (Adaptado de Chakrabarti, 2005).

* + 1. Linearização da força

Existem diversas formulações que permitem a determinação dos campos de força atuante em corpos submersos, as principais são a Formulação de Froude-Krylov, a Formulação de Morison e o Modelo de difração/radiação (Chakrabarti, 2005).

A escolha da formulação encontra-se associada às características hidrodinâmicas do corpo submerso, uma destas consiste no índice de esbeltez do corpo. Com informações de altura de onda (), diâmetro do corpo (), e comprimento de onda (), pode-se utilizar o ábaco presente na Figura 5 para a escolha da formulação.

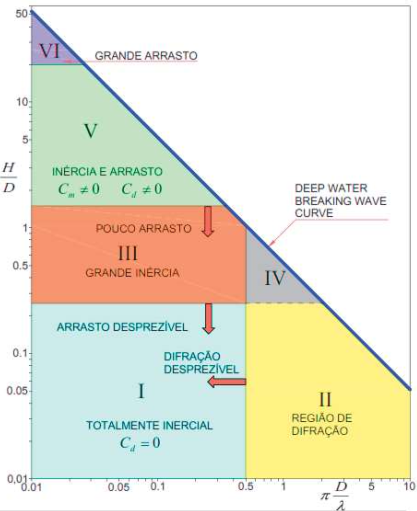


Figura 5 – Diferentes regimes de forças de ondas (Adaptado de DNVGL-RP-C205, 2017).

A formulação de Froude-Krylov é indicada quando associada a um campo de pressões no fluido proveniente de uma teoria linear de onda. O modelo de difração é recomendado para os casos em que as dimensões do corpo não são pequenas em relação ao comprimento de onda. Já a formulação de Morison apresenta sua maior aplicação associada a definição do campo de forças em corpos esbeltos.

Considerando a formulação de Morison para o cálculo da força resultante das ações de onda e correnteza atuantes sobre estruturas offshore, têm-se equação dada por

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (8) |

sendo a massa específica da água, o coeficiente de massa adicional, a área da seção transversal, a aceleração do fluido, a velocidade do fluido, a velocidade da estrutura, o coeficiente de arrasto e o diâmetro da seção transversal. É perceptível nessa expressão uma parcela da força composta pelo quadrado da velocidade relativa fluido-estrutura.

Observa-se que a parcela de arrasto da força dada pela formulação de Morison é não linear, desta forma, necessita-se de ser linearizada para permitir o uso de teorias lineares para a análise dinâmica no domínio da frequência.

Existem diferentes métodos de linearização da parcela de arrasto, segundo Dantas (2000) uma das técnicas de linearização utilizada na análise de *risers* rígidos verticais e que se encontra implementada em programas como RISERF (1995) e ALFREQ (1997) foi elaborada por Krolikowski e Gay (1980).

Tal método de linearização possui como vantagens a possibilidade de se considerar a velocidade da corrente assim como de se utilizar uma abordagem aleatória ou determinística para a teoria de onda, entretanto como restrições têm-se que o elemento estrutural deve estar na vertical, com a onda e a corrente alinhadas e atuando perpendicularmente ao elemento.

Este método pode ainda sofrer uma extensão para analisar *risers* verticais sob condições quaisquer de carregamento bastando realizar a linearização para cada direção de interesse independentemente. Para elementos não verticais é necessário realizar transformações vetoriais que levem as componentes de velocidade do sistema global para o sistema local e transformações que levem do sistema local para o global.

Outros métodos de linearização da parcela de arrasto que podem ser citados foram propostos por:

* Langley (1984)
* Rodenbusch et al. (1986)
* Leira (1987)
* Teng e Cheng Li (1990)
* Silva (2007)
  + 1. Considerações para a análise no domínio da frequência

Tanto na análise no domínio do tempo quanto em uma análise no domínio da frequência tem‑se o objetivo de buscar a solução para a equação de movimento apresentada na Equação (1).

Com a linearização da força solicitante por meio dos métodos de linearização descritos na Seção A.2.4 alcança-se um modelo hidrodinâmico linear equivalente ao modelo quadrático original. A solução dinâmica é alcançada considerando-se que o carregamento solicitante e sua respectiva resposta são compostos pela soma de funções trigonométricas senoidais e cossenoidais, com isto permitindo a representação do carregamento e resposta por meio das seguintes equações

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (9) |
|  |  | (10) |

sendo o vetor complexo de força constituído de amplitude e fase para a frequência da onda considerada, e o vetor complexo da resposta da estrutura.

Com isso, a velocidade e aceleração da estrutura podem ser expressos por

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (11) |
|  |  | (12) |

Com tais informações, substitui-se na equação de movimento de modo a se obter a seguinte expressão:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (13) |

Assume-se então que as matrizes de massa, rigidez e amortecimento não variam com o tempo de modo que se permite a construção da equação dinâmica no domínio da frequência como apresentada a seguir:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (14) |
|  |  | (15) |

Esta equação pode ser escrita da forma

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (16) |

sendo a função complexa representando o carregamento externo, e sendo a função complexa de resposta na frequência dada por

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (17) |

Desenvolvendo um pouco mais a formulação pode-se multiplicar o numerador e o denominador pelo conjugado do denominador como apresentado a seguir:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (18) |
|  |  | (19) |
|  |  | (20) |
|  |  | (21) |

Por fim, utilizando-se as seguintes relações dos números complexos, pode-se calcular os componentes real e imaginário do vetor de resposta da estrutura separadamente.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (22) |
|  |  | (23) |
|  |  | (24) |

Utilizando a expressão da Equação (22) e analisando a Equação (21) tem-se que

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (25) |
|  |  | (26) |
|  |  | (27) |
|  |  | (28) |

Com isso têm-se que

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (29) |

Por meio da propriedade de chega-se a:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (30) |

sendo a parcela real do vetor de forças externas e a parcela imaginária do vetor de forças.

* 1. Metodologia

Dentre os métodos de linearização apresentados, decidiu-se estudar mais profundamente o método de Krolikowski e Gay (1980) por ser utilizado em vários programas de análise dinâmica no domínio da frequência. O método de linearização de Krolikowski e Gay consiste na obtenção de coeficientes de linearização e de modo a linearizar a equação da força de arrasto, originalmente dada por

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (31) |

que é transformada em

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (32) |

sendo a força de arrasto não linear, a velocidade da onda, a velocidade da corrente, a força de arrasto linearizada, e coeficientes de linearização.

Krolikowski e Gay (1980) afirmam que a linearização é realizada de modo a minimizar o erro médio quadrático entre o termo não linear e o linear, e que tal erro é minimizado com a expansão da parcela de arrasto por série de Fourier. Além disso, considera-se apenas o primeiro termo da série por apresentar maior amplitude em relação aos demais. A linearização é dependente da forma de entrada, ou seja, depende do tipo de carregamento, que no caso podem ser:

1. Onda regular sem corrente
2. Onda regular com corrente
3. Onda irregular sem corrente
4. Onda irregular com corrente

sendo nos dois primeiros utilizada uma análise determinística e nos dois últimos uma análise aleatória. Apresenta-se a formulação para todos os casos de carregamento, sendo os casos de carregamento 1 e 3 situações específicas dos casos 2 e 4, respectivamente, uma vez que o método permite a consideração da corrente ou não. Deve-se destacar que não foi considerada a velocidade estrutural (ou seja = 0), assim, o *riser* é considerado como um corpo rígido indeformável, para a consideração desta velocidade é necessário a realização da análise dinâmica do sistema que por sua vez encontra-se em andamento. Além disto, considera-se que a onda e a corrente encontram-se alinhadas e atuando perpendicularmente ao *riser* que se apresenta na vertical, de maneira tal que a força atua na direção de incidência da onda, ou seja, na direção x. Para verificação da metodologia foram simulados *risers* na vertical sob a incidência de ondas regular e irregular, sendo a resposta obtida analisada por meio de sua média e desvio padrão, como apresentado por Dantas (2004).

* + 1. Linearização da força exercida por ondas regulares

Para o processo de linearização são necessárias informações da cinemática onda considerada, portanto apresenta-se o processo de obtenção de tais informações para então expor o processo de linearização. Para ondas regulares necessitam-se de três informações iniciais, altura , período , e lâmina de água , de modo que com isto é possível obter

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (33) |
|  |  | (34) |
|  |  | (35) |
|  |  | (36) |
|  |  | (37) |
|  |  | (38) |
|  |  | (39) |
|  |  | (40) |

sendo e variáveis auxiliares para o cálculo do comprimento de onda , o número de onda, a gravidade, a superfície de elevação da onda, consiste na altura em relação ao solo em que se deseja saber o valor da velocidade do fluido ao longo do tempo, obtido por meio do *Wheeler Stretching method* permite a consideração da superfície de elevação no cálculo da altura de modo a fornecer resultados mais precisos, amplitude da velocidade da onda, a velocidade da onda no tempo e a coordenada em que se deseja calcular a velocidade da onda e consequentemente a força de arrasto.

Desta forma, é possível obter os valores dos coeficientes de linearização a partir das seguintes equações a depender da relação entre a velocidade da corrente e a amplitude da velocidade da onda

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (41) |
|  |  | (42) |

Uma vez que o caso com onda regular sem correnteza é um caso particular da formulação dada na Equação (41), a equação para a força de arrasto pode ser dada por

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (43) |

sendo a frequência da onda em radianos por segundo.

Krolikowski e Gay (1980) deduzem que a Equação (31) para onda regulares sem correnteza pode ser bem linearizada pela Equação (43), ignorando os harmônicos de ordem superior provindos da expansão em série de Fourier.

* + 1. Linearização da força exercida por ondas irregulares

Semelhante ao processo para onda regular, no processo para ondas irregulares é necessário ter conhecimento acerca da cinemática da onda, sendo que para onda irregular é necessário que sejam fornecidos como parâmetros iniciais o espectro de onda, o período de pico , a altura significativa , lâmina de água ,e o número de ondas regulares que irão compor a onda irregular. Para o caso analisado considerou-se o espectro de Pierson-Moskowitiz. A frequência de pico, o espectro de Pierson-Moskowitz e o espectro de velocidade são dados por

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (44) |
|  |  | (45) |
|  |  | (46) |

sendo a frequência de pico, o espectro de onda, o espectro de velocidade da onda no ponto de interesse , sendo obtido por meio do *Wheeler Stretching method*.

Com tais informações, o processo de linearização da força de arrasto é dado por

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (47) |
|  |  | (48) |
|  |  | (49) |
|  |  | (50) |
|  |  | (51) |
|  |  | (52) |
|  |  | (53) |

sendo o desvio padrão da velocidade da onda, a variância da velocidade da onda, um fator adimensional que mede a importância relativa entre a onda e a corrente, a distribuição normal unidimensional de probabilidades e a função cumulativa correspondente.

A formulação para o cálculo da parcela de arrasto linear foi então implementada, assim como a não linear, para todos os casos de carregamento. Realiza-se então uma comparação entre as formulações para verificação da qualidade da linearização.

* + 1. Cinemática de onda no domínio da frequência

Matematicamente, ao se considerar a teoria linear de Airy com uma onda propagando-se na direção , as velocidades e acelerações do fluido em uma dada coordenada podem ser determinadas no domínio do tempo pelas seguintes equações:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (54) |
|  |  | (55) |
|  |  | (56) |
|  |  | (57) |

sendo , , e , as velocidades em x e z e acelerações em x e z respectivamente, e a fase da onda.

Enquanto que o cálculo das velocidades e acelerações do fluido em uma dada coordenada no domínio da frequência pode ser realizado por meio das seguintes equações:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (58) |
|  |  | (59) |
|  |  | (60) |
|  |  | (61) |

Para as ondas regulares a resposta da cinemática de onda no domínio da frequência será composta por apenas um pulso posicionado na frequência da onda e com magnitude que corresponde a amplitude da onda. Para as ondas irregulares a princípio constrói-se o espectro da onda, define-se o número de faixas (número de ondas) para divisão do espectro, para então em cada faixa avaliar a velocidade no domínio da frequência.

* 1. Resultados e discussões

Para verificação da metodologia de cálculo das forças hidrodinâmicas, são realizadas simulações considerando ondas regular e irregular. São implementadas as metodologias linear e não linear na mesma rotina, e o resultado comparado com o DOOLINES (Silveira et al., 2012), que consiste em um *framework* orientado a objetos que realiza a análise não linear de linhas de ancoragem e *risers* no domínio do tempo.

Para a verificação da implementação de construção da cinemática de onda no domínio da frequência, são realizadas simulações considerando ondas regular e irregular.

* + 1. Forças hidrodinâmicas para onda regular no domínio do tempo

Analisa-se um *riser* sobre a ação uma onda regular cujas características são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Dados de análise.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Onda/Solo** | | |
| **Parâmetros** | **Valor** | **Unidade** |
| Altura | 10 | m |
| Período | 11 | s |
| Lâmina da água | 1000 | m |
| ***Riser*** | | |
| Diâmetro | 0,5 | m |
| Comprimento | 1000 | m |
| Coeficiente de arrasto | 0,7 | - |
| **Corrente** | | |
| Velocidade (Perfil linear) | 1,0 | m/s |
| **Simulação** | | |
| Tempo | 28 | s |
| Profundidade de cálculo | 10 | m |

Define-se um ponto do *riser*, localizado a 10 m de profundidade, para o cálculo da força de arrasto atuante durante um tempo de 28 segundos. O histórico da força de arrasto ao longo do tempo no ponto de análise é apresentado na Figura 6.

Figura 6 – Comparação entre as forças de arrasto calculadas.

Percebe-se então que em um caso em que a força de arrasto possui grande importância no comportamento estrutural do elemento, a linearização apresentou boa conformidade com os resultados apresentados pela resposta não linear.

Verifica-se também, para o mesmo caso, a resposta da força de arrasto ao longo do comprimento do *riser* em um tempo específico de 5,5 segundos da simulação. Tal resultado é apresentado na Figura 7.

Figura 7 – Comparação entre as forças de arrasto ao longo do *riser*.

Nota-se que a linearização apresentou um comportamento semelhante ao da resposta não linear, numericamente esta semelhança pode ser avaliada com as informações presentes na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados para onda regular.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Variáveis** | **Valor** | **Unidade** |
| Média da força não linear | 376,9083 | N |
| Desvio padrão médio da força não linear | 511,7106 | N |
| Média da força linearizada | 373,0653 | N |
| Desvio padrão médio da força linearizada | 526,3010 | N |

Vale salientar que os valores dos coeficientes B1 e B2 não são apresentados devido à utilização do *Wheeler Stretching method* que necessita a avaliação da superfície de elevação ao longo do tempo. Assim, os valores dos coeficientes também variam ao longo do tempo.

Observa-se que a média das forças não linear e linear distam entre si de aproximadamente 3,8429 N, o que representa aproximadamente 1% do valor médio. Além disso, os valores do desvio padrão médio das forças também foram próximos.

* + 1. Forças hidrodinâmicas para onda irregular no domínio do tempo

Analisa-se um *riser* sobre a ação uma onda irregular, e um perfil de corrente linear, cujas características são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Dados de análise.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Onda/Solo** | | |
| **Parâmetros** | **Valor** | **Unidade** |
| Altura significativa | 8 | m |
| Período de pico | 10 | s |
| Lâmina da água | 500 | m |
| Número de ondas | 100 | - |
| ***Riser*** | | |
| Diâmetro | 0,5 | m |
| Coeficiente de arrasto | 0,7 | - |
| **Corrente** | | |
| Velocidade (Perfil linear) | 1,0 | m/s |
| **Simulação** | | |
| Tempo | 100 | s |
| Profundidade de cálculo | 10 | m |

A força de arrasto foi então calculada para a profundidade de 10 metros durante um tempo de 100 segundos. O resultado obtido encontra-se na Figura 8.

Figura 8 – Comparação entre as forças de arrasto calculadas.

Para a comparação entre os valores calculados da força de arrasto linearizada com a força de arrasto não linear, calculam-se informações de média e desvio padrão das forças analisadas e constrói-se a Tabela 4.

Tabela 4 – Resultados para onda irregular.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Variáveis** | **Valor** | **Unidade** |
| Média da força não linear | 179,9314 | N |
| Desvio padrão médio da força não linear | 60,8027 | N |
| Média da força linearizada | 184,1768 | N |
| Desvio padrão médio da força linearizada | 64,0994 | N |

Para este caso, a média das forças não linear e linear distam entre si de aproximadamente 4,2454 N, representando aproximadamente 2,3% do valor médio. Os valores do desvio padrão médio das forças também são próximos, caracterizando desta forma uma boa aproximação.

* + 1. Cinemática de onda no domínio da frequência para onda regular

Analisa-se uma onda regular com altura de onda () igual a 8 metros, período da onda () igual a 9,2 segundos e lâmina d’água () de 500 metros, avaliando-se a velocidade a uma profundidade de 10 metros da superfície. Considera-se também um perfil de velocidade constante para a corrente no valor de 1 m/s. Construindo-se a cinemática diretamente no domínio da frequência, tem-se o exposto na Figura 9.

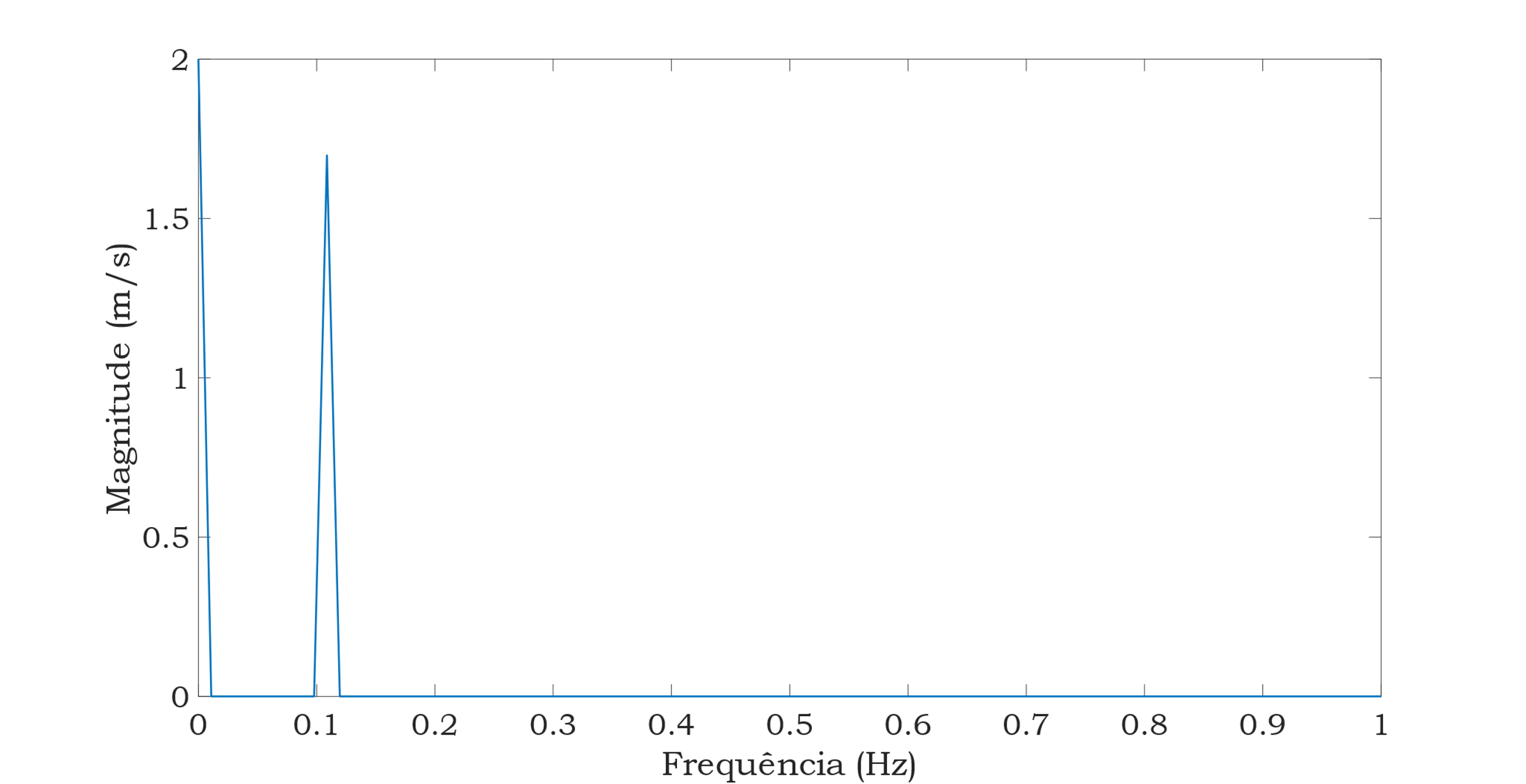


Figura 9 – Magnitude da velocidade no domínio da frequência.

Para verificação, constrói-se esta mesma onda no domínio do tempo, sendo apresentada na Figura 10, e por meio de uma Transformada Rápida de Fourier (Lathi, 2006), transformada que permite levar informações do domínio do tempo para o domínio da frequência, obtém-se a resposta no domínio da frequência como apresentado na Figura 11.

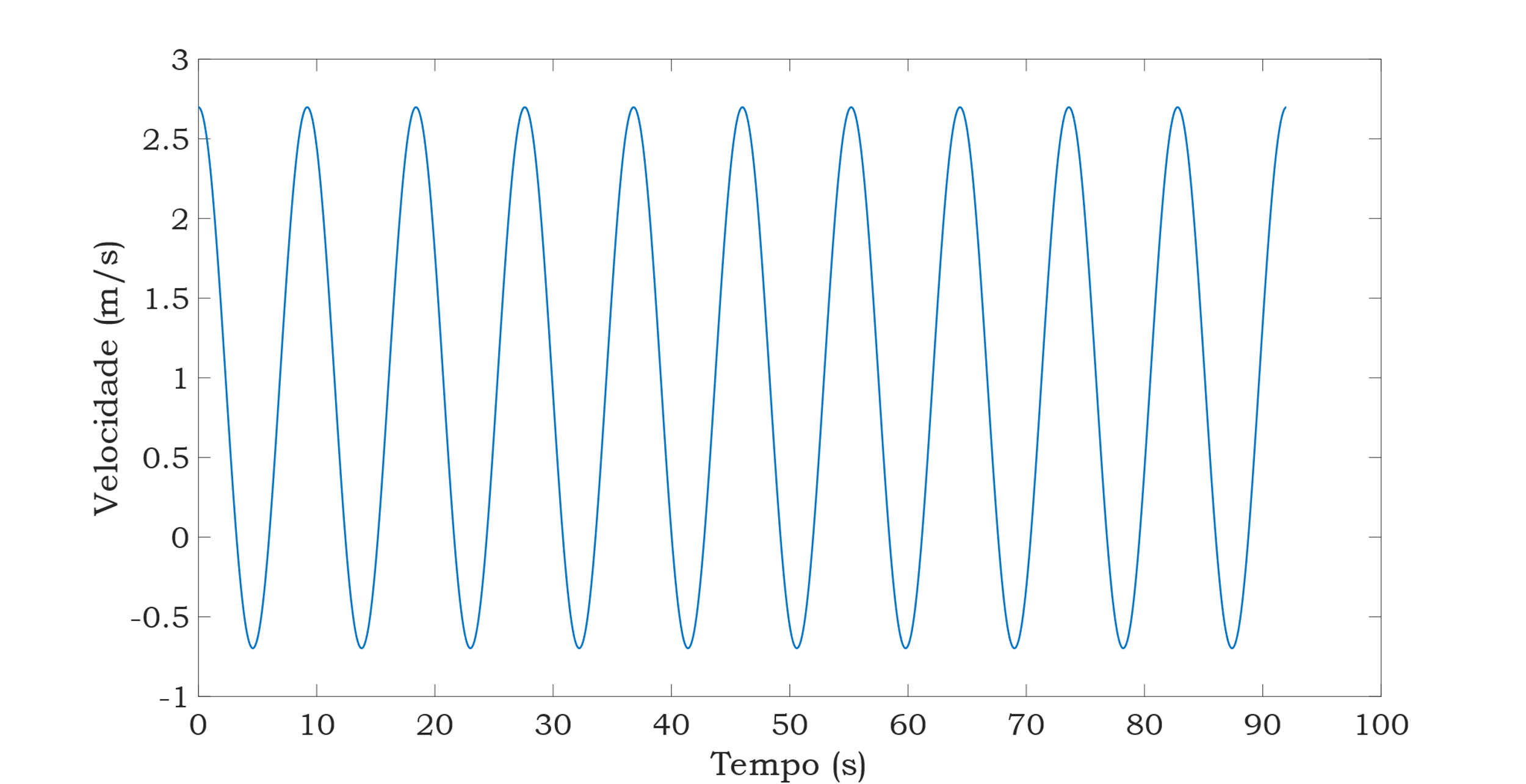


Figura 10 – Velocidade em função do tempo para o exemplo.

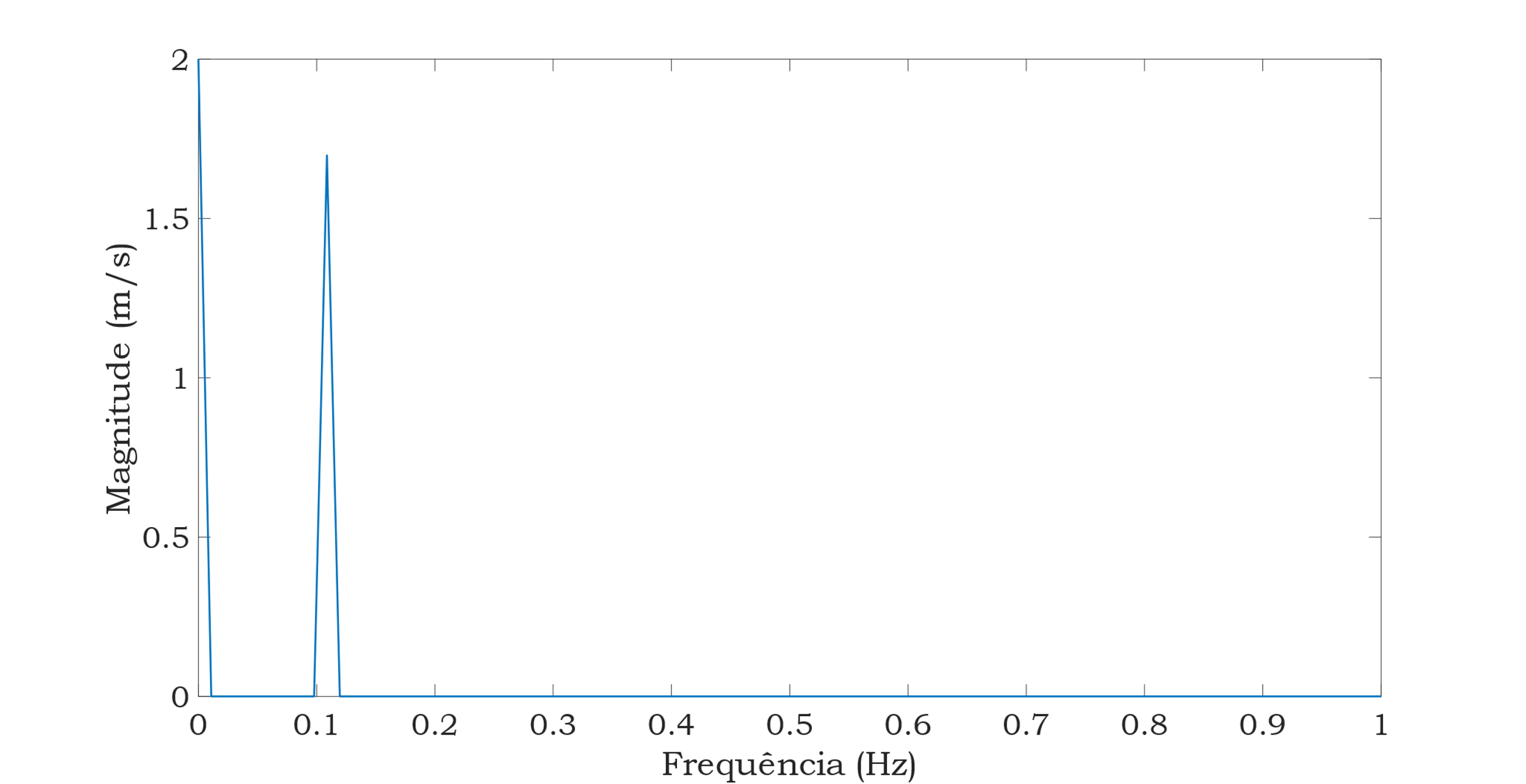


Figura 11 – Magnitude da velocidade em função da frequência após transformada de Fourier.

Comparando-se a Figura 9 com a Figura 11 percebe-se a igualdade entre os resultados.

* + 1. Cinemática de onda no domínio da frequência para onda irregular

Analisa-se uma onda irregular caracterizada pelo espectro de Pierson-Moskowitz com altura significativa igual a 5 metros, período de pico igual a 8,2 segundos, lâmina d’água de 500 metros, sendo composta por 10 frentes de ondas regulares, avaliando-se a velocidade a uma profundidade de 10 metros. A resposta no domínio do tempo é apresentada na Figura 12, já a resposta no domínio da frequência na Figura 13.

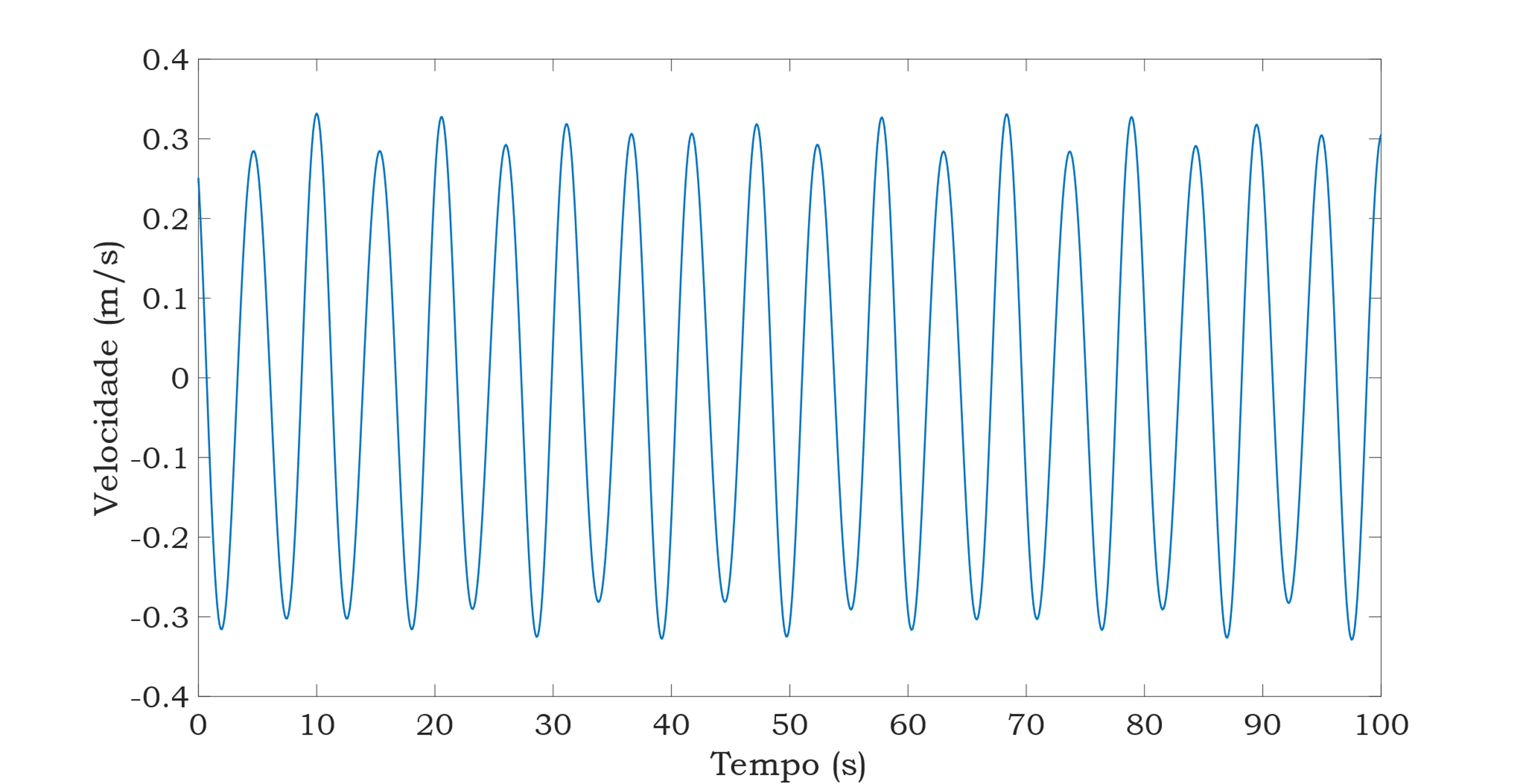


Figura 12 – Cinemática de onda irregular no domínio do tempo.

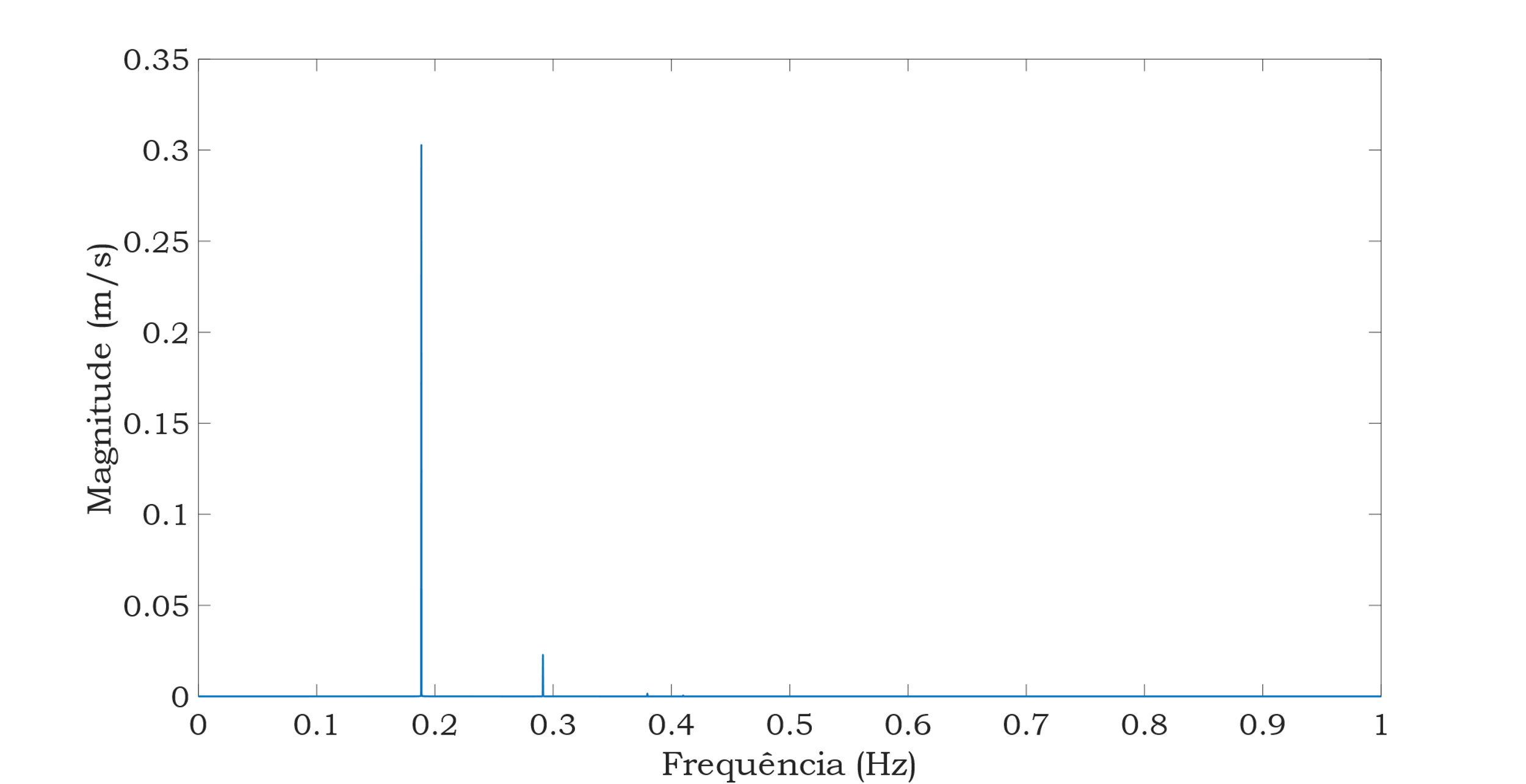


Figura 13 – Velocidade da onda irregular no domínio da frequência.

Deve-se relembrar que durante o processo de divisão do espectro da onda em um número finito de faixas são definidos pontos aleatórios dentro de cada faixa, destes pontos são extraídas as informações de amplitude, frequência e fase que representarão a faixa correspondente. Sendo assim, na Tabela 5 são apresentados os valores de amplitude, frequência, número de onda e fase para as 10 ondas que irão compor a onda irregular presente na Figura 12.

Tabela 5 – Dados extraídos da onda irregular no domínio do tempo.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Onda** | **Amplitude (m)** | **Frequência (Hz)** | **Número de onda** | **Fase (rad)** |
| 1 | 0,00000 | 0,00378 | 0,00034 | 0,23720 |
| 2 | 1,07985 | 0,18852 | 0,14307 | 5,56181 |
| 3 | 0,39809 | 0,29133 | 0,34167 | 5,73841 |
| 4 | 0,20798 | 0,37962 | 0,58015 | 5,00266 |
| 5 | 0,17200 | 0,40987 | 0,67630 | 0,62032 |
| 6 | 0,09239 | 0,52619 | 1,11460 | 1,64544 |
| 7 | 0,05814 | 0,63354 | 1,61578 | 2,10718 |
| 8 | 0,03595 | 0,76797 | 2,37428 | 4,27092 |
| 9 | 0,03112 | 0,81366 | 2,66515 | 0,85810 |
| 10 | 0,01995 | 0,97212 | 3,80437 | 4,53171 |

É importante destacar que os valores de magnitude presentes na Figura 13 indicam os valores máximos de velocidade que cada onda apresenta. Com os dados da Tabela 5 pode-se determinar os valores máximos de velocidade de cada onda por meio da Equação (62), e desta forma comparar com o apresentado pelo gráfico.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (62) |

Tabela 6 – Velocidade máxima das ondas que compõem a onda irregular no domínio do tempo.

|  |  |
| --- | --- |
| **Onda** | **Velocidade máxima (m)** |
| 1 | 0,00000 |
| 2 | 0,30588 |
| 3 | 0,02392 |
| 4 | 0,00150 |
| 5 | 0,00051 |
| 6 | 0,00000 |
| 7 | 0,00000 |
| 8 | 0,00000 |
| 9 | 0,00000 |
| 10 | 0,00000 |

Comparando-se os resultados presentes na Tabela 6 com o exposto na Figura 13 percebe-se a proximidade entre os resultados.

* + 1. Análise dinâmica no domínio da frequência para sistema com 1 grau de liberdade

Para entendimento acerca do cálculo para a análise dinâmica no domínio da frequência apresentado na Seção A.2.5 analisa-se um exemplo baseado ao apresentado por Ferreira et al (2009). O exemplo apresenta um sistema com um grau de liberdade considerando massa, rigidez e amortecimento como apresentado na Figura 14. O exemplo estudado possui massa igual a 10 toneladas, rigidez elástica igual a e coeficiente de amortecimento viscoso de . Tal sistema é submetido a um carregamento externo como apresentado na Figura 15.



Figura 14 – Sistema com um grau de liberdade.

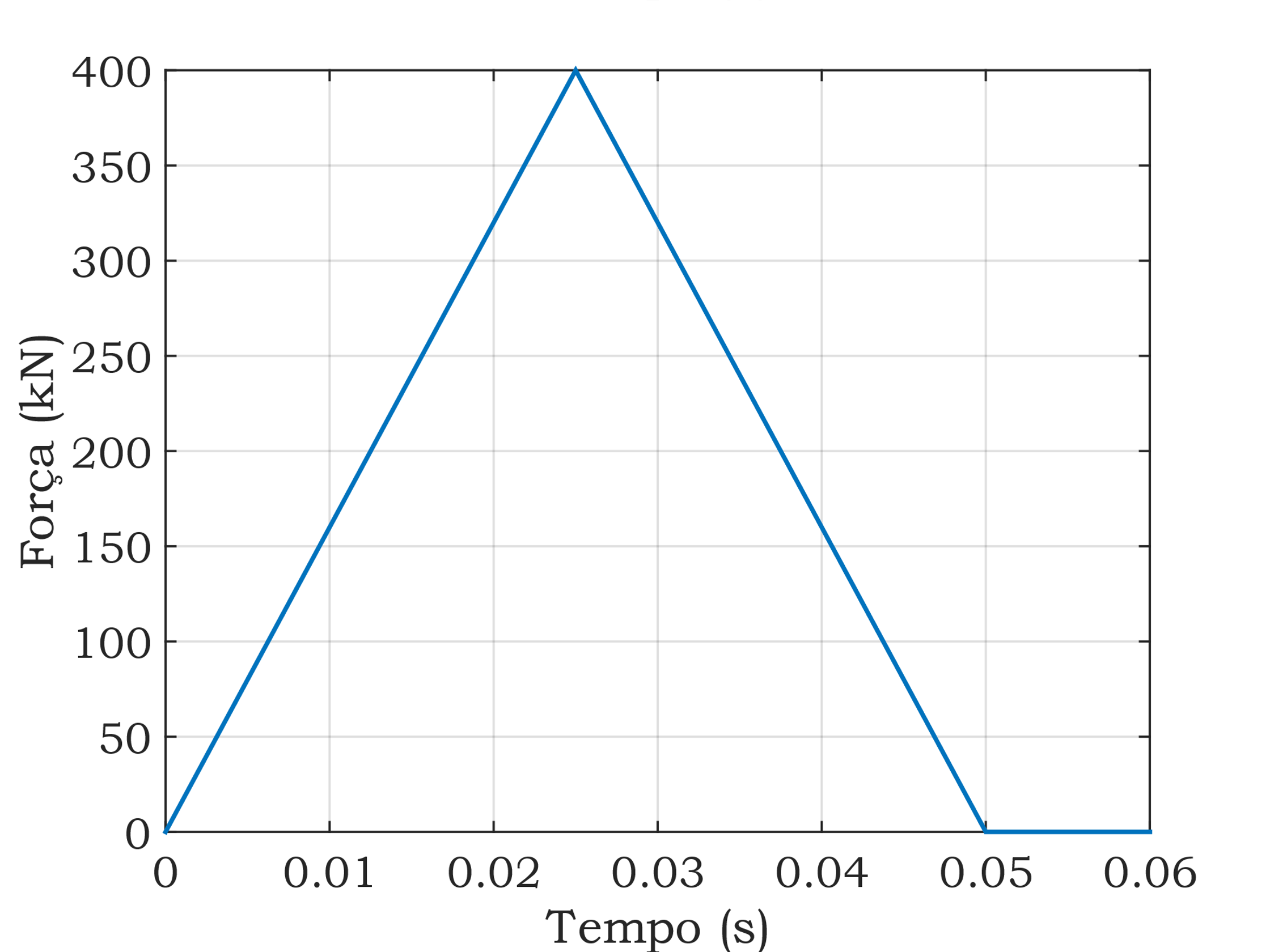


Figura 15 – Carregamento externo aplicado a estrutura.

Para a execução da análise dinâmica no domínio da frequência realiza-se a Transformada Rápida de Fourier (FFT) do carregamento para obtê-lo no domínio da frequência. Calcula-se a função complexa de resposta na frequência apresentada na Equação (17). Com isto obtêm-se o deslocamento no domínio da frequência por meio da Equação (16), permitindo a utilização da Transformada Inversa de Fourier (IFFT) para se obter o deslocamento no domínio do tempo. Para avaliação da metodologia de análise no domínio da frequência calcula-se a resposta do sistema por meio da resolução da equação de movimento no domínio do tempo, ou seja, resolve-se e equação diferencial.

Na Figura 16 apresenta-se o resultado do deslocamento calculado por meio da análise dinâmica no domínio da frequência, expõem-se o resultado até aproximadamente 1,3 segundos, momento no qual o sistema não sofre efeito do carregamento aplicado.

Na Figura 17 compara-se o resultado calculado por meio do domínio da frequência e o resultado calculado por meio do domínio do tempo, restringindo-se aos primeiros 0,4 segundos para melhor visualização.

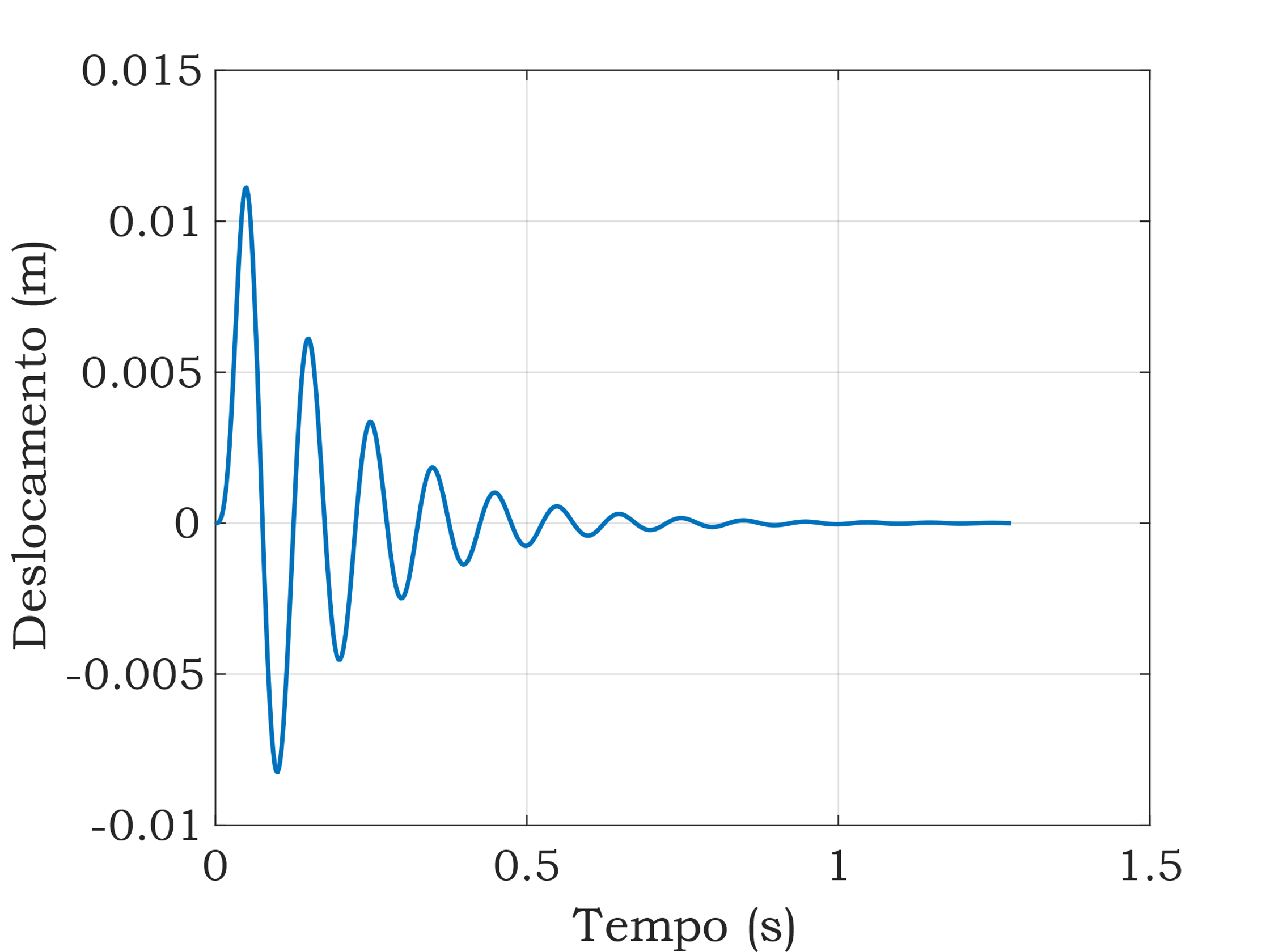


Figura 16 – Deslocamento em função do tempo calculado no domínio da frequência.

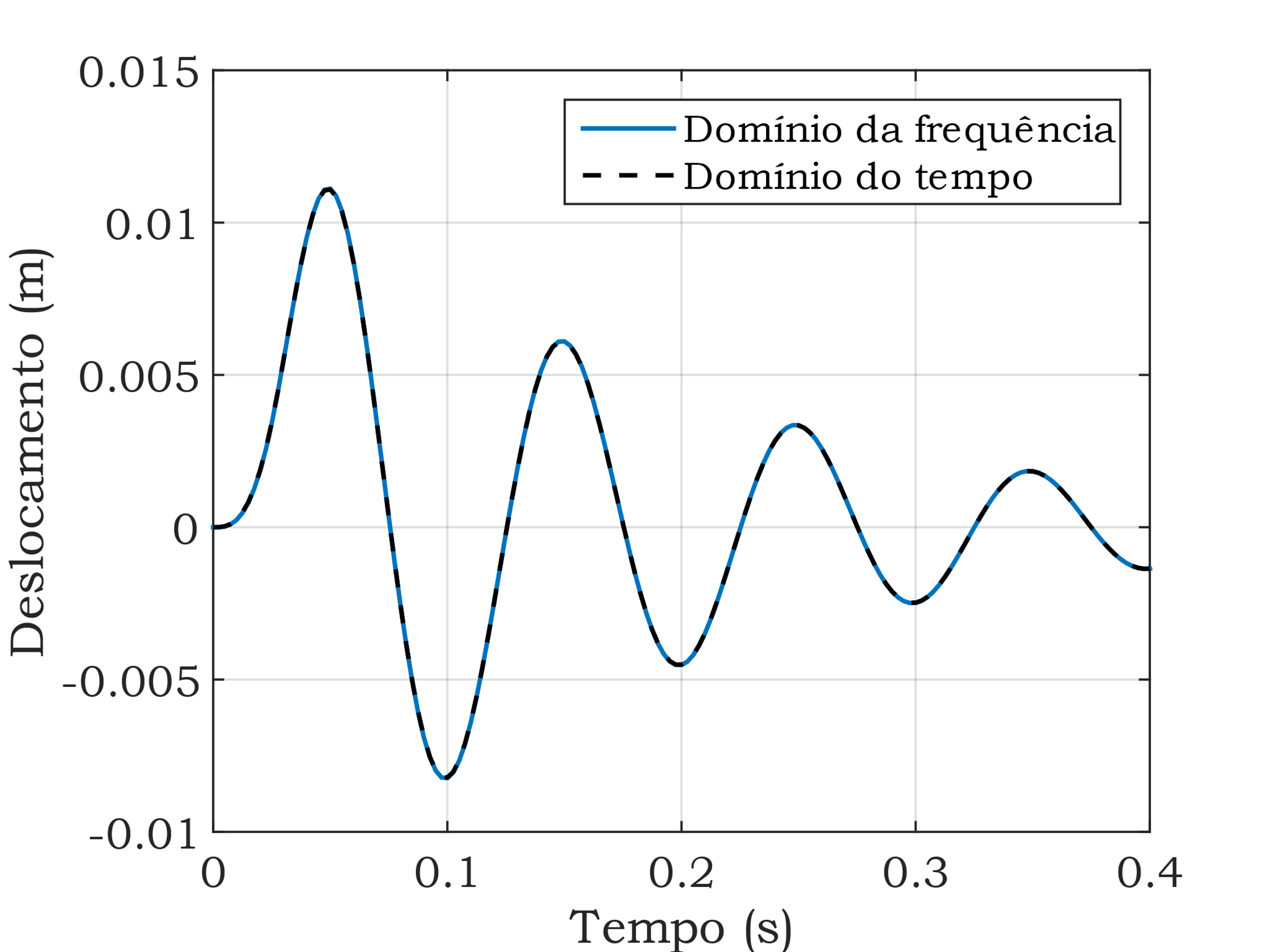


Figura 17 – Comparação entre os resultados calculados no domínio da frequência e tempo.

Conforme a Figura 17, observa-se que os resultados apresentados por ambas as metodologias estão compatíveis.

* 1. Considerações finais

Com tal estudo, pôde-se obter um primeiro contato com os conceitos de análise dinâmica no domínio da frequência, o que permitiu a decisão do estudo da linearização da parcela de arrasto da formulação de Morison para o cálculo da força hidrodinâmica atuante em estruturas *offshore*.

Os resultados demonstraram que a linearização pode apresentar bons resultados quando comparados com a resposta não linear. Utilizam-se a média aritmética e o desvio padrão médio para a verificação da qualidade da linearização. Para o caso de onda regular, percebe‑se uma diferença de 1% entre as médias obtidas, já para o caso de onda irregular, encontra-se uma diferença de 2,3%, que ainda assim são considerados bons. É apresentado também o comparativo com a resposta obtida pelo DOOLINES para demonstrar que as informações de cinemática de onda estão corretas, levando à conclusão que apenas o processo de linearização está afetando na resposta.

Construiu-se a cinemática de onda para ondas regulares e irregulares considerando-se a teoria linear de Airy, assim como foram realizadas verificações utilizando-se transformações entre o domínio do tempo e frequência para verificação da implementação, as verificações permitiram observar a concordância entre os resultados.

Apresentou-se o cálculo da análise dinâmica no domínio da frequência assim como os parâmetros necessários para o seu cálculo. Em seguida avaliou-se a resposta obtida por meio da análise dinâmica no domínio da frequência e tempo, com isso pode-se observar que o resultado foi equivalente para as duas metodologias, além disso percebe-se a maior simplicidade do processo de cálculo no domínio da frequência por necessitar apenas da resolução de equações algébricas.

Para estudos futuros restam a implementação de outros métodos de linearização para realização de comparações entre os métodos, além de um estudo sobre os demais fatores que influenciam na solução dinâmica no domínio da frequência. Sugere-se também a aplicação da metodologia de análise dinâmica no domínio da frequência para estruturas com múltiplos graus de liberdade.

* 1. Referências

ALFREQ – Análise Dinâmica Aleatória de Risers Rígidos e em Catenária. Manual de Entrada de Dados, 1997.

CARNEIRO, M. L. Desenvolvimento de dispositivo de geração e absorção ativa de ondas para tanque de ensaio de estruturas oceânicas. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 2007.

CHAKRABARTI, S. K. Handbook of offshore engineering. Illinois, EUA: Elsevier, 2005.

CLOUGH, R.W.; PENZIEN, J. Dynamics of Structures, 3rd edition. Computers & Structures, 1995.

COSTA, J. A. C. Estudo e implementação computacional de diferentes teorias de ondas oceânicas. Monografia de graduação em Engenharia Civil, UFAL, Maceió, 2008.

DANTAS, C. M. S., Análise de técnicas de linearização estatística da força de arrasto em estruturas *offshore*. Dissertação de mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2000.

DANTAS, C. M. S. Metodologia de análise de fadiga de risers rígidos no domínio da frequência com utilização de modelos hidrodinâmicos tridimensionais linearizados. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2004.

DNVGL-RP-C205 – Environmental conditions and environmental loads, Det Norske Veritas, august 2017.

Ferreira, W. G., Camargo, R. S., Frasson, A. M. F., Mansur, W. J., & Silveira, R. A. D. M. (2009). O número complexo e seu uso na engenharia civil.

KROLIKOWSKI, L. P.; GAY, T. A. An improved Linearization Technique for Frequency Domain Risers Analysis, OTC 3777, Houston, Texas, 1980.

LANGLEY, R. S. The Linearization of Three Dimensional Drag Forces in Random Seas with Current. Applied Ocean Research, 1984.

LATHI, B. P. Sinais e Sistemas Lineares. 2ª Ed., Porto Alegre, Editora Bookman, 2006. 856p.

LEIRA, B. J. Multidimensional Stochastic Linearization of Drag Forces. Applied Ocean Research, 1987.

RODENBUSCH, G.; GARRET, D. L.; ANDERSON, S. L. Statistical Linearization of Velocity-Squared Drag Forces. British Maritime Technology, 1986.

RISERF – Análise estática e dinâmica no domínio da frequência de risers rígidos dentro do ambiente Windows. Manual teórico, 1995.

SILVA, L. F. T. Análise determinística Tridimensional de Risers no Domínio da Frequência. Dissertação de mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2007.

SILVEIRA, E.S.S.; LAGES, E.N.; FERREIRA, F.M.G. DOOLINES: an object-oriented framework for non-linear static and dynamic analyses of offshore lines. Engineering with Computers, v. 28, n. 2, p. 149-159, 2012.

TENG, B.; CHENG LI, Y. The Linearization of Drag Force and the Error Estimation of Linear Force Spectrum. Elsevier Science Publishers B. V. 1990.