

15º Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP - 2024

PROGRAMA PARA ANÁLISE DE ARCOS ESTRUTURAIS SEMICIRCULARES SIMPLESMENTE APOIADOS

BEATRIZ CARVALHO ROSA¹, GUSTAVO CABRELLI NIRSCHL²

¹ Graduanda em Engenharia Civil, Bolsista PIBIFSP, IFSP, Campus Votuporanga, carvalho.rosa@aluno.ifsp.edu.br.

² Prof. Msc. na área de Engenharia Civil, Orientador PIBIFSP, IFSP, Câmpus Votuporanga, nirschl@ifsp.edu.br.
Área de conhecimento (Tabela CNPq): 3.01.02.04-9 Mecânica das Estruturas.

RESUMO: Existem inúmeros programas de computador que realizam quase todos os cálculos de engenharia civil, mas a maioria mostra somente os resultados finais ou alguns passos para se chegar até eles. Neste contexto, um grupo de pesquisa cadastrado no CNPq vem criando programas *on-line* que não só fazem cálculos, mas que demonstram todo o procedimento realizado. A criação dos programas é fracionada, de modo que se possam desenvolver projetos de iniciação científica sequenciais. Foi anteriormente desenvolvido pelo grupo um ambiente *on-line* para a análise de estruturas lineares planas, onde vários módulos vêm sendo criados sequencialmente. De modo semelhante, neste trabalho, apresenta – se a criação inicial de um ambiente gráfico que servirá de base para módulos futuros envolvendo a análise e dimensionamento de arcos estruturais. Além disso, mostra – se o primeiro módulo para a análise estrutural de arcos semicirculares simplesmente apoiados. O ambiente gráfico contém a entrada de dados numéricos e em desenho de arcos estruturais semicirculares, onde o usuário define a geometria, as vinculações e as ações. O módulo calcula os esforços da estrutura (diagrama de normal, cortante e momento fletor). O desenvolvimento dos aplicativos do grupo, incluindo o aqui apresentado, é realizado na linguagem HTML/Javascript. Os cálculos se mostraram exatos em relação a outro *software*, e a geração do relatório completo em PDF é o grande diferencial alcançado.

PALAVRAS-CHAVE: Programa *on-line*; Arcos; Base gráfica; Análise estrutural.

PROGRAM FOR ANALYSIS OF SIMPLY SUPPORTED SEMICIRCULAR STRUCTURAL ARCHES

ABSTRACT: There are numerous computer programs that perform almost all civil engineering calculations, but most of them only show the final results or a few steps leading to them. In this context, a research group registered with CNPq has been creating online programs that not only perform calculations but also demonstrate the entire process involved. The creation of these programs is segmented, allowing for the development of sequential scientific initiation projects. Previously, the group developed an online environment for the analysis of planar linear structures, where various modules have been created sequentially. Similarly, this work presents the initial creation of a graphical environment that will serve as the foundation for future modules involving the analysis and design of semicircular structural arches. Additionally, the first module for the structural analysis of simply supported arches is presented. The graphical environment includes both numerical input and the drawing of semicircular structural arches, where the user defines the geometry, supports, and loads. The module calculates the internal forces of the structure (normal force, shear force, and bending moment diagrams). The development of the group's applications, including the one presented here, is done in HTML/JavaScript. The calculations proved to be accurate compared to other software, and the generation of the complete report in PDF is the key distinguishing feature achieved.

KEYWORDS: Online Program; Arches; Graphical Interface; Structural Analysis.

INTRODUÇÃO

Silva (2017) define os arcos como estruturas cujo eixo principal é curvo, o que favorece a predominância de esforços de compressão e reduz os efeitos da flexão, especialmente em estruturas horizontais que vencem grandes vãos. A curvatura de um arco pode ser gerada por diferentes formas, como parabólicas, semicirculares ou elípticas, cada uma com suas particularidades estruturais.

Segundo Sales (2005), quando um arco segue o formato de um rebatimento de cabo — isto é, adota a forma de um polígono funicular para ações concentradas ou de uma catenária ou parábola para ações distribuídas —, ele transmite apenas esforços de compressão. Nesses casos, os diagramas de momento fletor e de cortante são nulos. No entanto, em arcos com outras geometrias, todos os tipos de esforços podem surgir, embora a compressão seja geralmente mais significativa.

Além dos arcos simplesmente apoiados, os arcos podem ser classificados em cinco tipos básicos: arco triarticulado, arco biengastado, arco biarticulado, arco atirantado e arco biengastado com articulação intermediária, conforme Silva (2017) e Sales (2005). Esses arcos apresentam seções transversais variadas, como retangulares, em I, ou treliçadas, além de seções variáveis. Diversos softwares, como RFEM 5 (DLUBAL (2022)), STRAP (2020) e STRUCTX (2022), estão disponíveis para a análise e dimensionamento de arcos, sendo utilizados tanto em ambientes comerciais quanto acadêmicos; no entanto, não demonstram todo o procedimento realizado.

Na Figura 1, apresenta-se um exemplo de arco estrutural semicircular simplesmente apoiado (isostático), cujos esforços são calculados por meio do equilíbrio de forças.

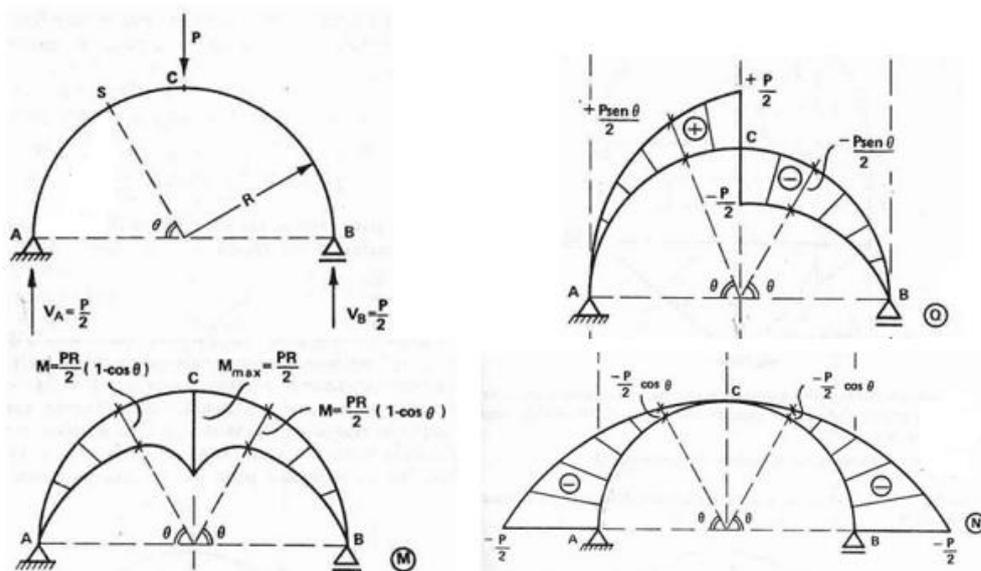


Figura 1. Análise estrutural de um arco semicircular, resultando nos diagramas de esforço normal, cortante e momento fletor. Fonte: Sussekind (1977).

MATERIAL E MÉTODOS

O que se apresenta neste artigo é a criação de um ambiente gráfico (disponibilizado *online*) que servirá de base para futura análise e dimensionamento de arcos. Também foi criado o primeiro módulo de cálculo, relacionado aos esforços de arcos semicirculares simplesmente apoiados.

A fundamentação teórica para o desenvolvimento do ambiente gráfico baseia-se em programação HTML/Javascript, especificamente utilizando o comando *Canvas*, conforme indicado em W3Schools (2020). Como exemplo, as Figuras 2 e 3 ilustram um programa *on-line* (<https://vtp.ifsp.edu.br/nev/Ifestrut/ifestrut.html>) desenvolvido pelo grupo de pesquisa no CNPq, que contém vários módulos para a análise de estruturas lineares planas, resultantes de trabalhos individuais e sequenciais.

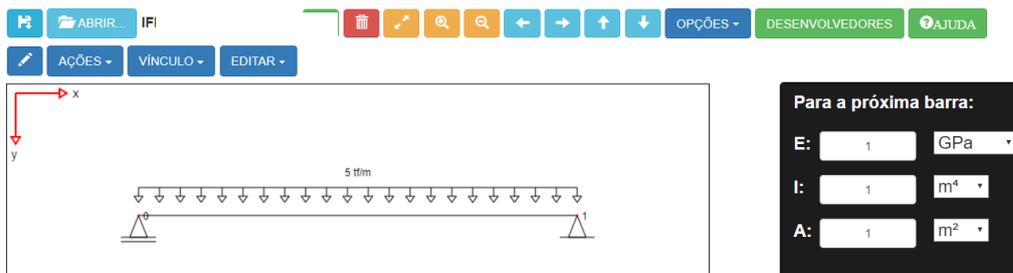


Figura 2. Exemplo de estrutura linear plana desenhada em ambiente gráfico *on-line* desenvolvido pelo grupo de pesquisa cadastrado no CNPq ao qual este trabalho faz parte. Fonte: O próprio autor usando o programa *on-line* (<https://vtp.ifsp.edu.br/nev/Ifestrut/ifestrut.html>).

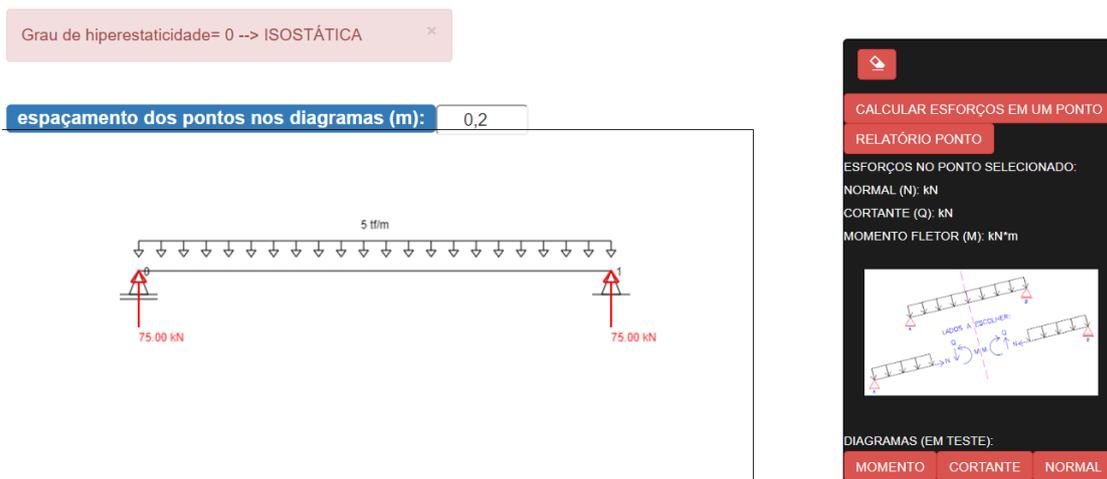


Figura 3. Exemplo dos resultados (reações) referentes à estrutura da figura 2. Fonte: O próprio autor usando o programa *on-line* (<https://vtp.ifsp.edu.br/nev/Ifestrut/ifestrut.html>).

O programa exibe os resultados na tela e gera um relatório em PDF com todos os cálculos realizados. Este artigo apresenta a criação inicial um programa similar para a análise de arcos estruturais. Futuras pesquisas irão expandir o programa com novos módulos de análise estrutural de arcos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A criação do programa, disponibilizado em <https://vtp.ifsp.edu.br/nev/ifestrut-arcos/ifestrut-arcos.html>, foi realizada utilizando uma linguagem de programação web (Figura 4), na qual o arco é exibido em uma tela 2D. Quando o usuário insere os dados de geometria, rigidez e vínculos para o desenho do arco e clica no botão ‘DESENHAR’, a linguagem é utilizada para que o arco seja representado com o tamanho correto e em escala, facilitando a visualização e análise do comportamento estrutural, conforme ilustrado na Figura 4.

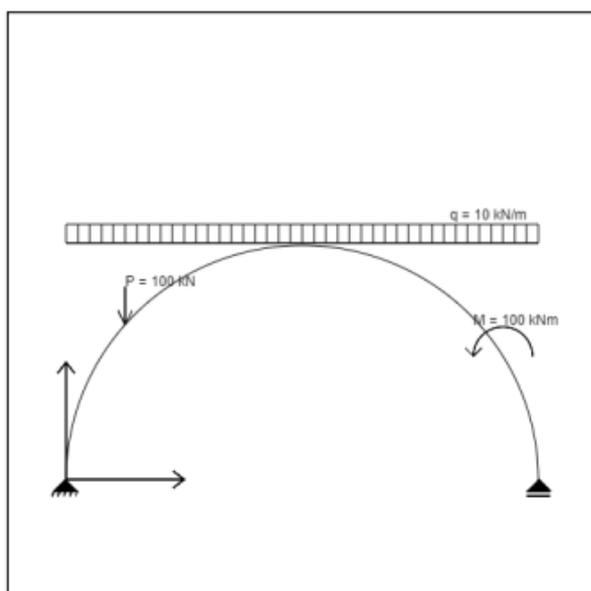
Para a inserção das ações no arco, o programa permite a adição de diferentes tipos de cargas. Os valores dessas cargas e suas respectivas coordenadas são armazenados em vetores, facilitando a manipulação matemática dos dados durante o processo de cálculo. Cada vetor contém informações sobre a magnitude, a direção e a posição de cada carga, possibilitando a construção de diagramas de esforços. As ações disponíveis incluem força distribuída, força concentrada e momento concentrado, conforme demonstrado na Figura 4. O botão ‘ADICIONAR’ permite ao usuário inserir cargas adicionais no arco, exceto a força distribuída, que é única e aplicada sobre toda a largura do arco, facilitando a visualização dos efeitos de diferentes combinações de ações sobre a estrutura.

Os valores da rigidez do arco (momento de inércia da seção transversal, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson do material do arco) não foram utilizados nos cálculos deste

primeiro módulo do programa (por se tratar de arcos isostáticos), mas poderão ser usados em módulos futuros que calcularem, por exemplo, arcos hiperestáticos e/ou deformações em arcos.

ARCOS ESTRUTURAIS

GEOMETRIA E RIGIDEZ Raio R (m): <input type="text" value="20"/> Momento de inércia I (m ⁴): <input type="text" value="0,00106666"/> Modulo de elasticidade E (GPa): <input type="text" value="210"/> Coeficiente de poisson v : <input type="text" value="0,3"/> <input type="button" value="DESENHAR"/>	VÍNCULOS Esquerda: <input type="button" value="Apelo fixo"/> Direita: <input type="button" value="Apelo móvel"/>	AÇÃO Carga distribuida q(kN/m): <input type="text" value="10"/> <input type="button" value="ADICIONAR"/> NÚMERO DE PONTOS - DIAGRAMA: <input type="text" value="10"/>	AÇÃO Carga pontual P(kN): <input type="text" value="100"/> Coordenada (x): <input type="text" value="5"/> Direção: <input type="button" value="vertical"/> <input type="button" value="ADICIONAR"/>	AÇÃO Momento Concentrado M(kN*m): <input type="text" value="100"/> Obs:convenção= horário negativo(-), anti horário positivo(+) Coordenada (x): <input type="text" value="37"/> <input type="button" value="ADICIONAR"/>
--	---	---	--	---



FUNÇÕES

Figura 4. Página criada e disponibilizada na *web* (<https://vtp.ifsp.edu.br/nev/ifestrut-arcos/ifestrut-arcos.html>). Fonte: A própria autora usando o programa criado.

A lista suspensa exibida na parte inferior da tela da Figura 4, com o título "FUNÇÕES", possui as opções de métodos de cálculo (que serão adicionados futuramente, por outras pesquisas), a opção de limpar a tela e de redesenhar a tela.

A primeira opção de método de cálculo que foi adicionada nesse modulo foi criada para a análise estrutural do arco semicircular simplesmente apoiado, com os cálculos feitos por equilíbrio de forças e superposição dos efeitos das ações.

A partir das cargas aplicadas sobre o arco, o programa exhibe os diagramas de esforços selecionados pelo usuário, que podem incluir cortante, normal e momento fletor, conforme exemplificado na Figura 6. Após a exibição dos esforços selecionados, o usuário pode obter o relatório de cálculo clicando no botão 'RELATÓRIO', onde são demonstrados todos os procedimentos realizados para o cálculo dos esforços, juntamente com os diagramas. As partes inicial e final do relatório estão exemplificadas na Figura 7.

Para comparar os resultados obtidos, um arco foi aproximado por 50 pontos formando segmentos de barras no *software* Ftool, de Martha (2017), conforme a Figura 5, que mostra seu diagrama de momento fletor. O raio utilizado foi de 60 metros, com uma carga pontual de 100 kN aplicada no centro do arco. O mesmo exemplo feito no programa está na Figura 6. Os resultados obtidos pelo Ftool foram iguais aos mostrados pelo programa aqui apresentado.

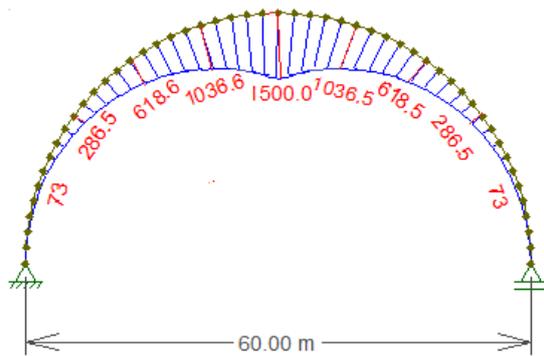
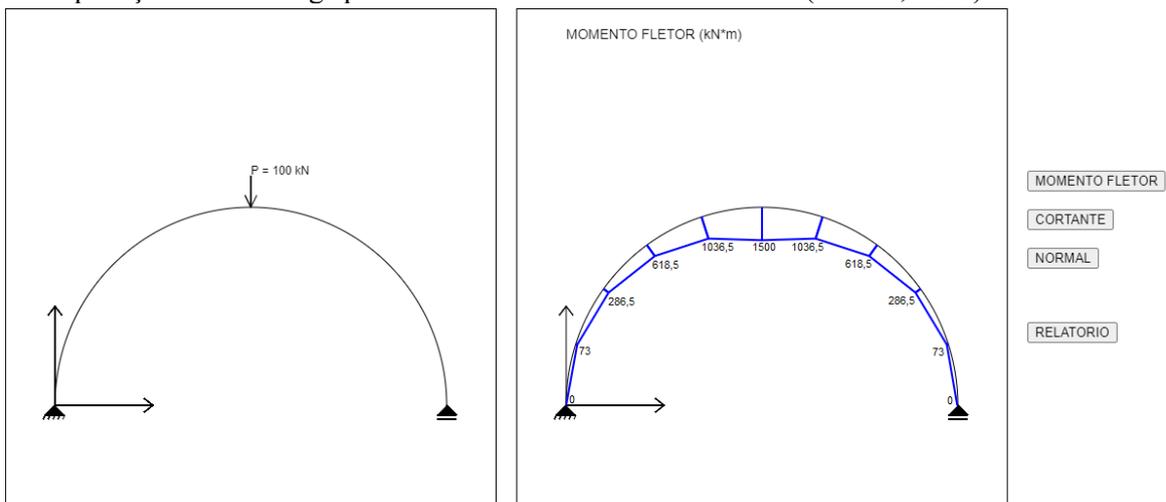


Figura 5. Diagrama de esforço de momento fletor de um arco semicircular simplesmente apoiado com aplicação de uma carga pontual no centro do vão. Fonte: Ftool (Martha, 2017).



ARCO SIMPLEMENTE APOIADO-EQUILIBRIO ▾

Figura 6. Diagrama de esforço de momento fletor de um arco semicircular simplesmente apoiado com aplicação de uma carga pontual no centro do vão. Fonte: A própria autora usando o programa (<https://vtp.ifsp.edu.br/nev/ifestrut-arco/ifestrut-arco.html>).

TO TRANSLATE THIS DOCUMENT, DOWNLOAD THE PDF REPORT AND TRANSLATE ON <https://www.onlinedoctranslator.com/pt/> (FREE - GENERATE COMPLETE PDF TRANSLATED FILE) OR TRANSLATE ON <https://translate.google.com/> (SELECT DOCUMENTS - FREE - BUT ONLY TRANSLATE TEXT)

NEV: Núcleo de Engenharia Virtual
 Título: Programa On-line para análise estrutural de arcos semicirculares simplesmente apoiados
 Autor: Beatriz Carvalho Rosa
 Orientador: Prof. Gustavo Cabrelli Nirschl
 Tipo: Iniciação Científica com Bolsa Institucional
 Curso: Engenharia Civil
 Data da versão original: 30/11/2024
 Data da última atualização: 30/11/2024
 Data da geração do relatório: 22/10/2024

CÁLCULO DE ARCO SEMICIRCULAR SIMPLEMENTE APOIADO

(...)

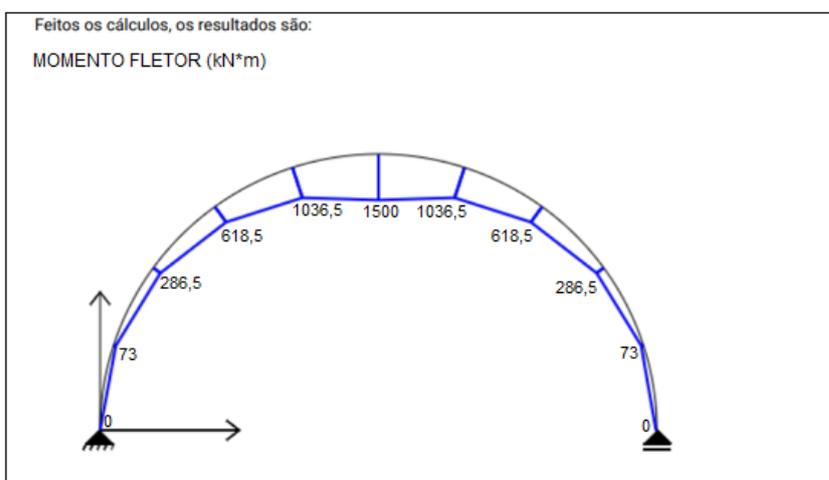


Figura 7. Partes inicial e final do relatório de cálculo gerado pelo programa. Fonte: A própria autora usando o programa (<https://vtp.ifsp.edu.br/nev/ifestrut-arcos/ifestrut-arcos.html>).

CONCLUSÕES

A criação do ambiente gráfico 2D para arcos estruturais, desenvolvido em linguagem de internet, foi realizada de forma satisfatória, atendendo os objetivos inicialmente propostos, ou seja: permitir a entrada gráfica de arcos, incluindo a definição de geometria, vínculos e ações; realizar o cálculo dos esforços para arcos semicirculares simplesmente apoiados; e fornecer um relatório que documenta de forma detalhada todos os cálculos realizados durante a análise estrutural, descrevendo os procedimentos seguidos. Esse programa servirá como base para o desenvolvimento futuro de módulos de análise estrutural, a ser utilizado por professores de engenharia civil, especialmente da área de estruturas, que fazem parte do grupo de pesquisa cadastrado e ativo no CNPq.

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

P.V.F.C. atuou na pesquisa, curadoria e análise dos dados, além de conduzir a redação do trabalho. G.C.N contribuiu com a supervisão e revisão do trabalho, além de aprovar a versão submetida.

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia pela oportunidade de realizar as atividades, por meio do programa PIBIFSP, e ao meu orientador.

REFERÊNCIAS

DLUBAL (Alemanha). **RFEM 5**: Programa estrutural de MEF para uso profissional. 5.28.03. Tiefenbach, 2022. Disponível em: <https://www.dlubal.com/en/products/rfem-fea-software/what-is-rfem>. Acesso em: 5 out. 2024.

SALES, José Jairo de. *et. al.* **Sistemas Estruturais** – Departamento de Engenharia de Estruturas – EESC-USP. São Carlos, 2005.

SILVA, Fabrício Costa. **Análise de sistemas estruturais metálicos em arco para centros esportivos**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

STRAP (Israel). **STRAP**. 2020. Disponível em: http://www.sae.eng.br/software/strap/info_strap.html. Acesso em: 02 setembro 2022.

STRUCTX (Israel). **STRUCTX**. 2022. Disponível em: <https://structx.com/>. Acesso em: 02 setembro 2022.

SÜSSEKIND, J.C. **Curso de Análise Estrutural** – Vol. 1: Estruturas Isostáticas, Editora Globo, Porto Alegre, 1977.

MARTHA, L. F. **Ftool**: Two-dimensional Frame Analysis Tool. Versão básica 4.00.03. Ftool para Windows. Rio de Janeiro: Instituto Tecgraf/PUC-Rio, 2017. Disponível em: <http://www.ftool.com.br>. Acesso em: 14 outubro 2024.