ANÁLISE NUMÉRICA DE ESTRUTURAS DIAGRID EM AÇO CARBONO E AÇO INOXIDÁVEL POR MEIO DO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Daniel Wills Gonçalves Mota

Engenheiro Civil pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro
(UERJ), Rio de Janeiro, RJ, Brasil
danielwills.engenharia@gmail.com

Monique Cordeiro Rodrigues

Doutora em Engenharia Civil pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
(PUC-RJ), Rio de Janeiro, RJ, Brasil
moniquecordeirorodrigues@gmail.com

Luciano Rodrigues Ornelas de Lima

Doutor em Engenharia Civil pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
(PUC-RJ), Rio de Janeiro, RJ, Brasil
lucianolimauerj@gmail.com

RESUMO

Uma das mais recentes soluções empregadas na construção de prédios de elevada altura, que permite redução econômica e menor utilização de material é o sistema tubular *Diagrid*. Esse sistema é composto por diagonais e se comporta de maneira similar a uma treliça espacial, oferecendo às fachadas dos prédios uma arquitetura inovadora e notável. O emprego deste novo sistema estrutural pode ocasionar em determinadas construções a dispensa da utilização de colunas no interior dos prédios, possibilitando uma maior área livre de circulação, a maior incidência da iluminação natural e uma redução de materiais na construção dos edifícios. As ligações desse tipo de estrutura devem ter atenção especial, a fim de também possibilitar tais reduções. Este trabalho tem como objetivo analisar estrutural e economicamente as ligações *Diagrid*, por meio da análise do comportamento das ligações empregando o método dos elementos finitos por meio do programa ANSYS, realizando uma comparação entre o aço carbono e o aço inoxidável, proporcionando um melhor entendimento sobre este sistema estrutural. Para as análises estruturais considerou-se a influência das cargas verticais e horizontais no sistema e a resistência dos materiais empregados. Estudou-se o aço inoxidável do tipo austenítico, duplex e lean duplex, e a influência na angulação da inclinação da malha *Diagrid*. Observou-se nos estudos desenvolvidos que o ângulo de inclinação que apresentou melhor resistência foi o de 70° e que a comparação de custos, apenas de materiais, entre o aço carbono e o aço inoxidável ainda indica uma diferença considerável para a aplicação do aço inoxidável nas estruturas.

Palavras-chave: Ligações Tubulares. Diagrid. Modelagem Numérica. Método dos

Elementos Finitos. Aço Inoxidável.

NUMERICAL ANALYSIS OF DIAGRID STRUCTURES ON CARBON STEEL AND STAINLESS STEEL BY THE FINITES ELEMENTS METHOD.

ABSTRACT

One of the latest solutions used in high-rise buildings, which allows economic reduction and less material use is the Diagrid tubular system. This system is composed of diagonals and behaves in a manner similar to a space truss, giving the façades of the buildings an innovative and remarkable architecture. The use of this new structural system can cause in certain constructions the dispensation of the use of columns inside the buildings, allowing a greater free area of circulation, the greater incidence of the natural illumination and a reduction of materials in the construction of the buildings. Joints of this type of structure should be given special attention in order to enable such reductions. The aim of this work is to analyze the structural and economical connections of the Diagrid connections by analyzing the behavior of the joints using the finite element method through the ANSYS program, making a comparison between carbon steel and stainless steel, providing a better understanding of this structural system. For the structural analysis, the influence of the vertical and horizontal loads in the system and the resistance of the materials used were considered. Austenitic, duplex and lean duplex stainless steels were studied, as well as the influence on the slope angulation of the Diagrid mesh. It was observed in the developed studies that the angle of inclination that presented better resistance was the one of 70 ° and that the comparison of costs, only of materials, between the carbon steel and the stainless steel still indicates a considerable difference for the application of the stainless steel structures.

Keywords: Tubular Connections. Diagrid. Numerical Modeling. Finite Element Method. Stainless steel.

1 INTRODUÇÃO

A sustentabilidade urbana e o desenvolvimento das construções são os assuntos chave para o bem-estar da população e da sociedade. O desenvolvimento sustentável é definido por meio de uma descrição apresentada na Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento das Nações Unidas, pelo Relatório Brundtland em 1987, como o "desenvolvimento que supre a necessidade presente sem comprometer as habilidades das gerações futuras para suprir as próprias necessidades" (AMBIENTE BRASIL, 2017). Os dilemas sustentáveis são amplamente abordados na área da construção civil, que permeiam questões relacionadas ao consumo de energia do setor, além das

questões dos materiais empregados, considerando desde sua produção, utilização e descarte. A verticalização das construções surge como uma ferramenta adotada para crescimento urbano visando o balanceamento do crescimento populacional junto à oferta de moradias, sem que seja necessária a abertura de novos terrenos para exploração imobiliária e comercial, preservando áreas verdes e facilitando o crescimento de moradias.

Na construção civil, o aço desenvolveu-se como uma alternativa de material e de solução construtiva por ser mais eficiente, quando considerado o tempo de execução, a quantidade de material empregado e os resíduos gerados. Diversas “soluções verdes”, visando à minimização de emprego do aço estrutural foram desenvolvidas nos últimos anos, entre elas o sistema *Diagrid*, que é considerada a mais promissora solução para altos prédios, ditos arranha-céus. De acordo com o artigo de Milana et al. (2015), o sistema economiza em cerca de 20% de peso estrutural de aço quando comparado com um sistema convencional, chamado ao redor do mundo de sistema ortogonal, composto por vigas e pilares num arranjo de 90°. A Figura 1 mostra a estrutura de um sistema *Diagrid* em um edifício real e a sua respectiva fachada, local onde predominantemente funciona o sistema estrutural.

Figura 1 – Sistema *Diagrid* do Edifício Hears Tower – Nova York

Fonte: (Lui e Ma, 2016).

O sistema *Diagrid* consiste em uma estrutura triangular composta por membros diagonais e vigas de suporte, dando a configuração triangular, possuindo membros diagonais espalhados pela fachada dos prédios, permitindo a eliminação das colunas verticais convencionais. O sistema *Diagrid* é modelado como vigas em balanço vertical no solo, e subdividida longitudinalmente em módulos de acordo com as respectivas características do sistema adotado. O *Diagrid* possui a principal função de receber os esforços laterais e verticais graças à sua configuração triangular, resistindo eficientemente também às cargas gravitacionais. Em comparação com os sistemas estruturais ortogonais sem membros diagonais, os *Diagrids* são muito mais eficazes na minimização da solicitação de esforço cortante porque transformam o cisalhamento em forças axiais atuantes em elementos reticulados, enquanto que as estruturas tubulares convencionais transformam o cisalhamento em flexão nas colunas verticais. Conclui-se assim, que o sistema *Diagrid* mostra-se mais eficiente na absorção dos esforços laterais e por isso o seu grande emprego em estruturas em arranha-céus, onde a magnitude do vento é uma variável importante a ser considerada nos cálculos dos esforços atuantes.

Os módulos *Diagrid* sujeitos a carregamentos gravitacionais são submetidos a cargas verticais gerando em suas diagonais, forças axiais, concomitantemente em compressão e tração.

Quando sujeitas a cargas horizontais, referentes ao vento, o prédio é submetido a duas situações diferentes. A primeira é o aparecimento de um momento, causando cargas verticais nas ligações dos módulos onde sua intensidade e direção, vão depender da posição do módulo do *Diagrid* observado. A segunda situação é o aparecimento de forças laterais nas ligações dos módulos, principalmente absorvida pelos módulos paralelos a direção do vento.

A transferência de cargas para o módulo ocorre em cada nível de piso dos andares e, assim, também concentra cargas ao longo do comprimento diagonal. A introdução de um membro horizontal em cada andar gera uma interseção com a diagonal, uma viga intermediária ou secundária, permitindo a absorção da componente de força ortogonal à direção da diagonal.

O objetivo deste trabalho é realizar um estudo da solução estrutural denominada de sistema *Diagrid*, por meio da análise de suas ligações, possibilitando entender as principais diferenças para o sistema ortogonal, mundialmente difundido, e posteriormente se aprofundando na avaliação do comportamento estrutural do *Diagrid*, submetido a determinados cenários de cargas com diferentes configurações geométricas e materiais

constituintes, sendo apresentados os resultados obtidos para o uso de aço carbono e aço inoxidável, avaliando a diferença no conceito físico e econômico entre ambos. Para tanto foi desenvolvido um estudo paramétrico por meio do Método de Elementos Finitos, empregando o programa Ansys, onde foi desenvolvido um modelo numérico.

Pelo fato do sistema *Diagrid* ser um sistema inovador e atualmente em desenvolvimento e estudo, as características geométricas do sistema variam de caso para caso, tendo cada edifício seu arranjo do sistema, com características geométricas diversas, pois pelo fato do sistema ser similar a uma treliça espacial e apresentar características geométricas em função da altura, magnitude do vento e a possível presença de movimentação terrestre, o projeto é desenvolvido exclusivamente para o edifício estudado. Portanto utiliza-se como modelo de estudo o edifício St. Mary Axe, conforme Figura 2, constituído de sistema *Diagrid* com tubos de seção circular, retangular e nós de complexa estrutura. Na análise realizada no presente trabalho, a ligação do edifício escolhido como modelo-base levou em consideração as características geométricas, e foi modificada de modo que o modelo numérico seja simplificado.

Figura 2 – Sistema Diagrid do Edifício 30 St Mary Axe – Londres

Fonte: (Mele et al., 2014).

2 DESENVOLVIMENTO

Para um maior entendimento dos resultados é importante conhecer os componentes existentes no nó do sistema *Diagrid*, e seu funcionamento em relação à interação entre cada elemento, de forma a se prever o comportamento do nó da ligação quando submetido a cargas. Os tubos diagonais encontrados no edifício 30 St. Mary Axe são do tipo seção circular (CHS) e variam de 273x12,5 mm no topo a 508x40 mm na base do edifício. As barras horizontais encontradas no edifício são tubos de seção retangular (RHS) 250x300x25 mm e o elemento central, uma chapa, realizando a ligação entre os tubos diagonais e as barras horizontais, que atua como receptor e distribuidor das cargas, composto por 3 peças: chapa de ligação, chapa central e enrijecedores. Para melhor visualizar esses elementos, a Figura 3 é apresentada. Os elementos são constituídos de aço carbono, com tensão de escoamento (f_y) de 250 MPa, com curva elasto-plástica.

No desenvolvimento do modelo numérico foi dada importância especial a divisão das malhas na chapa central, procurando evitar elementos triangulares, conforme recomendação do Ansys (2010), finalizando o modelo numérico apresentado na Figura 4. Esse procedimento é repetido para a criação dos modelos numéricos com ângulo de inclinação entre as diagonais de 50°, 60° e 70°, possibilitando o estudo da influência da inclinação das diagonais no sistema *Diagrid*.

Figura 3– Elementos da ligação do sistema *Diagrid*

Fonte: (Oliveira, 2013).

Figura 3 – Modelo numérico com geometria finalizada

Fonte: (Os Autores, 2019).

No o início do estudo das ligações do sistema *Diagrid*, foi identificada a necessidade de se conhecer a magnitude das forças aplicadas aos elementos da ligação para que se possa ter a proporção de forças absorvidas por cada tubo da ligação. Sendo assim, foi necessário o desenvolvimento de um estudo prévio das cargas aplicadas. O objetivo deste estudo é conhecer de forma aproximada a distribuição das cargas, sejam elas originadas pelo peso próprio da estrutura, sobrecarga ou cargas de vento atuantes, que será transportada em forma de tensão para a chapa central. Para prosseguir com o estudo aproximado, o programa de análise estrutural tridimensional MASTAN2 (2007) foi utilizado. Uma pequena estrutura tridimensional de malhas foi desenvolvida com o objetivo de se obter uma aproximação do que é respondido pelos tubos quando submetidos a diferentes cenários de cargas atuantes. Foram desenhados pórticos circulares, assim como o 30 St. Mary Axe, abrangendo dois módulos de Diagrid, com ângulos de inclinação das barras diagonais diferenciados, 50°, 60° e 70°, possibilitando abranger o estudo para diversas análises do sistema, com diferentes características geométricas submetidos às mesmas solicitações, simulando o desempenho do sistema.

Após o conhecimento da geometria proposta, e a aplicação de tal geometria no MASTAN2 (2007), foram aplicadas cargas unitárias laterais (em kN), simulando a ação do vento e cargas unitárias verticais, simulando a ação do peso próprio e sobrecarga na estrutura. A norma brasileira ABNT NBR 8800 (2008), fornece a orientação das combinações de diferentes tipos de cargas no estado limite último (ELU). Para o modelo em questão foram descartadas as ações excepcionais e utilizados os coeficientes de 1,25

e 1,40, para as ações permanentes (peso próprio) e variáveis (vento), respectivamente.

Os resultados preliminares das análises são obtidos por meio do modelo apresentado na Figura 5, de onde são retiradas as forças absorvidas pelas diagonais e elementos horizontais, e aplicadas posteriormente nas diagonais do modelo numérico.

A seguir, foi estudada a influência das forças aplicadas em uma ligação (nó) do sistema *Diagrid* e seus respectivos elementos presentes, com o objetivo de estudar individualmente a magnitude das forças aplicadas absorvidas por cada elemento. Os carregamentos foram aplicados em forma de deslocamentos, nos nós de apoio. A escolha de aplicação de deslocamento permite alcançar trechos de curva que tem decréscimo de carga, fato não possível para o caso de incremento de força.

Figura 5 – Estrutura preliminar analisada no Mastan2

Fonte: (Os Autores, 2019).

3 RESULTADOS

Foram estudadas as variações dos ângulos de inclinação da ligação, de forma a verificar o ângulo que apresenta melhores resultados em relação ao material empregado e, por conseguinte, redução de peças. Para a conclusão da análise serão observados os pontos de escoamento de cada modelo, a carga absorvida pelas diagonais no momento de escoamento e o rendimento do modelo numérico. Tal estudo indicou que os modelos com melhores resultados foram os com ângulo de inclinação de 70°, como mostra o Figura 6.

Figura 6 – Gráfico de carga de escoamento *versus* ângulo de inclinação.

Fonte: (Os Autores, 2019).

Em seguida foram aplicados três tipos de aço inoxidável: austenítico ($f_y = 200$ MPa), duplex ($f_y = 515$ MPa) e lean duplex ($f_y = 355$ Mpa). Tais materiais não consideraram a mudança dos elementos envolvidos, em um primeiro momento. A modelagem consideração a curva multilinear para o material. Observou-se que houve um acréscimo de resistência na ligação, com o uso de tais materiais, conforme Figura 6.

Desta forma, em um segundo momento, buscou-se estudar a redução dos elementos empregados, considerando esse aumento de resistência do uso do aço inoxidável. Para tanto, foi realizada a comparação entre a ligação modelo em aço carbono e uma ligação com redução de espessura dos tubos em aço inoxidável duplex. Tal alteração mostrou a redução de volume de material em 40% para o uso do aço inoxidável, considerando que ambas as ligações suportariam as mesmas cargas aplicadas.

No estudo da redução do material (Tabela 1), onde é apresentado o comparativo de volumes entre o aço carbono e o aço inoxidável, considerando a possibilidade de fabricação dos elementos sugeridos. Observa-se ainda que os elementos de ligação (chapas e enrijecedores) correspondem a 12% do total de volume empregado em cada modelo estudado. Desta forma, alterações da espessura dos elementos não impactarão na maior parcela do custo verificado, sendo então uma opção viável para alteração. Porém, devido ao custo superior do aço inoxidável, mesmo com a redução do material,

seu valor final ainda é maior que o dobro da ligação em aço carbono.

Considerando a redução obtida, o estudo final consistiu em uma análise de custos dos modelos comparados. Apesar da redução do material quando utilizada a ligação em aço inoxidável, observou-se que devido ao elevado valor desse material, ainda nota-se que a ligação ficaria com valor elevado, na ordem de duas vezes comparada ao aço carbono, porém um estudo de custo posterior a execução da ligação mostra que o custo de manutenção de uma ligação em aço inoxidável após 38 anos de utilização, baseado nos dados apresentados por Cardoso (2013), se torna economicamente melhor, por apresentar um baixo custo de reparo, sendo necessário no momento da escolha do material componente da ligação *Diagrid* um estudo de viabilidade econômica, levando em consideração o valor de implementação da ligação e os futuros gastos com manutenções, como mostra o Figura 7.

Tabela 1 – Comparativo de materiais entre aço carbono e aço inoxidável

Quant.	Peso específico (kg/m³)	Elemento	Volumes (m³)	Volume total (m³)	Peso (kg)	Preço Unitário (R\$ / kg)	Preço Total (R\$)
Aço carbono	7850	Tubos	0,84	0,97	7614,5	12,00	91.374,00
		Chapa central	0,05				
		Enrijecedores	0,08				
Aço inoxidável Duplex	7800	Tubos	0,52	0,59	4602,0	42,00	193.284,00
		Chapa central	0,03				
		Enrijecedores	0,04				

Fonte: (Os Autores, 2019).

Um fator importante não considerado nas análises que levariam a uma menor diferença de preço entre as ligações em aço carbono e aço inoxidável duplex é a influência da diminuição do peso próprio das peças em aço inoxidável nos módulos inferiores, podendo acarretar ainda uma maior economia.

Figura 7 – Gráfico de custo de manutenção em 50 anos nos aços carbonos e inoxidável

Fonte: (Os Autores, 2019).

Observa-se que para os casos de combinações estudadas, nos diferentes ângulos de inclinação e materiais aplicados, a chapa de ligação, pontos principais dos enrijecedores diagonais e da chapa central foram os elementos com maior atuação de tensões, ou seja, os mais solicitados, indicando que a plastificação inicia-se no contato entre as peças diagonais, principalmente na chapa de ligação e chapa central. Tal situação pode ser verificada na Figura 8, enquanto as nomenclaturas atribuídas às peças podem ser vistas na Figura 3.

Figura 8 □ Pontos de concentração de tensão na Ligação *Diagrid*

Fonte: (Os Autores, 2019).

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho visou estudar uma ligação *Diagrid*, partindo de uma aproximação de um edifício modelo, onde foram realizadas tentativas, por meio de ferramentas computacionais, de desenvolver com certo grau de fidelidade, as características encontradas no edifício modelo, 30 St. Mary Axe, uma vez que tais dados não eram disponibilizados com clareza nas fontes disponíveis. O método considerou a simplificação do modelo, pois, na realidade, uma malha interconectada no perímetro de uma edificação, possui uma distribuição de esforços diferenciada do modelo sugerido, já que os pontos de aplicação das cargas seriam diversos e muito superiores aos apresentados, gerando uma diferença entre as proporções de cargas permanentes e cargas variáveis. Além disso, o edifício modelo apresenta ângulo de inclinação entre o plano da fachada e o sistema *Diagrid*, e ao se considerar no trabalho que o plano da fachada possui inclinação nula, as peças podem ter apresentado diferenças para as cargas reais atuantes no edifício modelo. Porém, tais simplificações permitem um melhor entendimento das ligações *Diagrid*, não inviabilizando tal análise, já que o estudo de cargas foi realizado para a estrutura simplificada.

Foram estudadas as variações dos ângulos de inclinação da ligação, de forma a verificar o ângulo que apresenta melhores resultados em relação ao material empregado e, por conseguinte, redução de peças. Tal estudo indicou que os modelos com melhores resultados foram os com ângulo de inclinação de 70°.

Observou-se que houve um acréscimo de resistência na ligação, com o uso de tais materiais. Desta forma, em um segundo momento, buscou-se estudar a redução dos elementos empregados, considerando este aumento de resistência do uso do aço inoxidável. Para tanto, foi realizada a comparação entre a ligação modelo em aço carbono e uma ligação com redução de espessura dos tubos em aço inoxidável duplex, resultando numa redução volumétrica de 40%.

O estudo final consistiu em uma análise de custos dos modelos comparados. Apesar da redução do material quando utilizada a ligação em aço inoxidável, observou-se que devido ao elevado valor desse material, ainda nota-se que a ligação ficaria com valor elevado, na ordem de duas vezes comparada ao aço carbono, porém um estudo de custo posterior a execução da ligação mostra que o custo de manutenção de uma

ligação em aço inoxidável após 38 anos de utilização, se torna economicamente melhor, por apresentar um baixo custo de reparo, sendo necessário no momento da escolha do material componente da ligação *Diagrid* um estudo de viabilidade econômica, levando em consideração o valor de implementação da ligação e os futuros gastos com manutenções. Um fator importante não considerado nas análises que levariam a uma menor diferença de preço entre as ligações em aço carbono e aço inoxidável duplex é a influência da diminuição do peso próprio das peças em aço inoxidável nos módulos inferiores, acarretando numa maior economia.

Pode-se também observar que, as peças que apresentaram maior concentração de tensões, e por conseguinte, os elementos mais solicitados, por meio dos diagramas de distribuição de tensões de von Mises., foram as chapas de ligação, enrijecedores e chapas centrais.

Com a análise de distribuições de tensões, sugere-se que poderiam ser realizados estudos sobre a influência do aumento de espessura nos elementos mais solicitados, de forma a melhorar a resistência, sem impactar significativamente no volume final da ligação, uma vez que foi verificado que tais elementos correspondem a 12% do volume final das ligações estudadas.

Os resultados encontrados indicam a necessidade de uma análise não apenas de custos para a aplicação do aço inoxidável, mas em relação à redução de material, que colabora com a preocupação ambiental, bem como a facilidade de manutenção deste material. Tal análise poderia ser realizada por meio do ciclo de vida da construção e não apenas em termos de valores iniciais e custos de materiais.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto em edifícios**. 2008.

AMBIENTE BRASIL. **Desenvolvimento Sustentável**. Disponível em: <ambientes.ambientebrasil.com.br/gestão/artigos/desenvolvimento_sustentavel.html>. Acesso em: 27 out. 2017.

CARDOSO, R. P. DE. **AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE SUBESTAÇÕES DE ENERGIA COM O USO DO AÇO INOXIDÁVEL**, 114f. Dissertação de mestrado - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Estruturas e Fundações, UERJ, Rio de Janeiro, 2013.

Liu CQ, Ma KQ. **Calculation model of the lateral stiffness of high-rise Diagrid tube structures based on the modular method.** *Struct Design Tall Spec Build.* 2016; 26 e1333. <https://doi.org/10.1002/tal.1333>.

MASTAN2, version 3.5, 2007.

Mele, E., Toreno, M., Brandonisio, G. and De Luca, A. **Diagrid structures for tall buildings: case studies and design considerations.** *Struct. Design Tall Spec. Build.*, 23: 124–145, 2014. doi:10.1002/tal.1029.

Milana, G.; Olmati, P.; Gkoumas, K.; Bontempì, F. **Ultimate Capacity of Diagrid Systems for Tall Buildings in Nominal Configuration and Damaged State.** *Periodica Polytechnica Civil Engineering.* 59. 381-391, 2015.

OLIVEIRA, J. M. R. DE. **ANÁLISE NUMÉRICA DE LIGAÇÕES DIAGRID PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS.** 2013. 70f. Projeto Final (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Estruturas e Fundações, UERJ, Rio de Janeiro, 2013.