

OTIMIZAÇÃO NO CORTE DE PERFIS METÁLICOS DOBRADOS COM ÊNFASE NA REDUÇÃO DAS PERDAS

Jorge Luis Alves Alencar¹; Domingos Jorge Ferreira da Silva²
jorgeluisalvesalencar@gmail.com¹; DomingosSilva@ufgd.edu.br²

RESUMO – A construção civil com estruturas de aço dobrado a frio tem ganhado notoriedade no mercado. Isso ocorre pois o modelo estrutural historicamente mais utilizado, o concreto armado, possui desvantagens no âmbito do desperdício de material e geração de entulho. Para propor uma solução a esse problema, além da substituição das estruturas de concreto por aço, busca-se a otimização nos processos de fabricação das peças, para que dessa forma, a sua utilização seja ainda mais vantajosa. Este trabalho se ocupa em compatibilizar o projeto estrutural em aço com o projeto de fabricação dos perfis, de modo a promover a utilização da chapa de aço em sua completude, evitando o desperdício no corte. Para isso foi feito um estudo de caso, aplicando a metodologia a um galpão fictício de dimensões 36m x 72m. Esse galpão foi calculado utilizando perfis de catálogo padrão e também perfis otimizados com a dimensão da chapa de corte. Com isso foi possível quantificar a diferença percentual em massa das duas situações. A obra com a aplicação do princípio mostrou-se 5% mais leve, o que implica em uma economia de aço e nas fundações, além de evitar 22% do peso da obra em perdas, o equivalente a 14 toneladas de material.

Palavras-chave: Estruturas metálicas, Perfis dobrados, Desperdício.

ABSTRACT – Construction with cold-bent steel structures has gained notoriety in the market. This is because the historically reinforced concrete has disadvantages in the area of material waste and debris generation. To propose a solution to this problem, in addition to replacing concrete structures with steel, we seek to optimize the manufacturing processes of parts. This work is concerned with making the structural steel design compatible with the stud fabrication design, in order to promote the use of the steel plate in its entirety, avoiding waste in cutting. For this, we applied the methodology to a dummy warehouse with dimensions 36m x 72m. This shed was calculated using standard catalog studs as well as studs optimized with the size of the cutting plate. The work with the application of the principle was 5% lighter, besides avoiding 22% of the weight of the work in losses, equivalent to 14 tons of material.

Keywords: Steel structures, Cold-formed steel, Waste.

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, enfrenta-se o grande problema do desperdício de materiais na construção civil. A demanda por recursos torna-se cada vez maior e a redução na utilização de materiais faz-se necessária com o intuito de atenuar as consequências ambientais e os prejuízos econômicos intrínsecos a esse problema. Segundo Maydl (2004) metade de toda a matéria prima extraída na União Europeia é utilizada em obras de construção civil, e um quarto de todos os resíduos sólidos produzidos são oriundos de canteiros de obras. Sendo assim, medidas que busquem a economia de material bem como a redução nos resíduos propiciariam uma alternativa de desenvolvimento sustentável.

O interesse nessa área tem sido despertado não apenas pela questão ambiental, mas também porque as perdas implicam em prejuízo financeiro. Comparada a indústria automobilística, a construção civil utiliza cerca de 100 a 200 vezes mais materiais, afirma Sousa (2005). Esse fato faz com que as ações tomadas na otimização dos recursos nessa área tenham grande impacto na economia e no desenvolvimento sustentável de um país. O mesmo autor classifica as perdas quanto à sua natureza como perdas incorporadas, e entulho. As perdas incorporadas são características das atividades “in loco” que incorporam uma quantidade de material superior a prescrita teoricamente, como por exemplo um traço de concreto com excesso de cimento. As perdas por entulho são definidas como todo lixo que sai da obra, e podem ser exemplificadas com materiais que são perdidos por cortes, ajustes de dimensão e retrabalhos.

Diante disso, a construção em aço tem ganhado notoriedade no cenário atual e um de seus atrativos é o apelo ecológico da reciclabilidade do aço. De acordo com a Associação Brasileira de Construção em Estruturas Metálicas (ABCEN) em uma pesquisa com 259 empresas foi constatada uma produção de 697 mil toneladas apenas no ano de 2017 (ABCEN, 2018). O que demonstra a pungência desse setor promissor como um substituto das estruturas convencionais de concreto armado.

Embora a utilização de estruturas metálicas ao invés de concreto por si só já contribua para a redução do desperdício de material e geração de entulho nas obras, ainda é possível otimizar a forma como ocorre o corte das chapas de aço para que não haja perdas na fabricação dos perfis formados a frio.

Buscamos constatar que a etapa do dimensionamento das estruturas metálicas não deve apenas se ocupar dos esforços solicitantes e resistências das peças. É necessário pensar na forma como os perfis serão fabricados, no transporte, mão de obra e disponibilidade de material. Promovendo a conciliação entre o projeto estrutural e o de

fabricação das peças pode-se ocasionar um maior aproveitamento do material utilizado, reduzindo prejuízos e otimizando a construção.

Analisando os catálogos de perfis formados a frio nota-se que usualmente as peças são feitas para as mesmas dimensões de perfis, variando apenas a espessura da chapa de corte. Esse modelo de produção faz com que a dimensão de corte nem sempre seja múltipla da dimensão da chapa, o que acarreta em um corte não exato e por conseguinte uma perda do tipo entulho. Diante disso, o presente trabalho propõe o ajuste dos perfis ainda no processo de dimensionamento, inferindo que uma ação nesse sentido poderia reduzir essas perdas e promover a utilização por completo da chapa, sem desperdício. Nisso consiste a justificativa deste trabalho, integrar os projetos estruturais e de fabricação com o intuito de minimizar o desperdício de aço no corte das peças.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. O DESPERDÍCIO DE MATERIAIS

O enorme volume de entulho gerado pelas obras de construção é o alarme gritante que evidencia a ocorrência do desperdício. Todavia, ainda existem as perdas incorporadas, que não são notáveis à primeira vista, e que só podem ser constatadas através da análise das quantidades teóricas de projeto e as realmente executadas para cada material. Juntando essas duas parcelas (entulho e perda incorporada) com a perda de materiais que ocorre ainda no processo de fabricação chega-se à conclusão de que medidas precisam ser tomadas no âmbito da gestão para que se impeça que problemas como esses cheguem a níveis ainda mais graves.

Ilustrando a gravidade do problema, o autor Pinto (1989) analisou a construção de um edifício e comparou a quantidade de materiais requeridos em projeto com aquilo que foi adquirido em nota fiscal. Pode-se observar na Tabela 1 os valores calculados de perda em função do tipo de material analisado. Os indicadores obtidos não necessariamente deverão ser utilizados como parâmetros absolutos, pois o espaço amostral da pesquisa é restrito a uma obra apenas, entretanto, eles servem para mostrar através de um exemplo prático o quão crítico é o quadro e em quais tipos de materiais a perda se mostra mais significativa.

Tabela 1 – Percentual de Perdas em uma obra

Materiais	Perda detectada (%)	Expectativa usual de perda (%)
Madeiras	47,5	15
Aço CA50	26,0	20
Componentes de vedação	13,0	5
Cimento CP32	33,0	15
Cal hidratada	102,0	15
Areia	39,0	15

Fonte: Pinto, (1989).

Os dados obtidos mostram que ocorrem perdas significativas em quase todos os tipos de materiais utilizados em uma obra convencional com estrutura em concreto armado, alvenaria de vedação e revestimento com emboço. Visando expandir o espaço amostral dessa pesquisa, o Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da USP (USP) realizou um estudo em mais de 100 canteiros de obra espalhados por 12 estados do Brasil. Com isso foi possível obter, além de dados mais representativos, medidas de dispersão que quantificassem a variação das perdas de região para região. Os resultados dessa pesquisa encontram-se na Tabela 2 e podem ser utilizados para embasar uma análise mais completa acerca do problema.

Tabela 2 - Perda de materiais segundo estudo da Escola Politécnica da USP

Materiais	Valor das Perdas				Número de casos estudados
	Média (%)	Mediana (%)	Máximo (%)	Mínimo (%)	
Areia	76	44	311	7	28
Cimento	95	56	638	6	44
Pedra	75	38	294	9	6
Cal	97	36	638	6	12

Fonte: Escola Politécnica da USP, (2019).

Nota-se pela Tabela 2 que as perdas de todos os materiais utilizados na fabricação do concreto são maiores que as expectativas usuais adotadas por Pinto (1989), ou seja, o sistema construtivo de estruturas mais utilizado é responsável pelos mais elevados índices de perdas. Também fica explícito pelas medidas de dispersão apresentadas pelo autor que na segunda pesquisa apresentada a quantia perdida varia de acordo com os casos, não sendo assim um valor estável do ponto de vista estatístico, cada caso apresenta suas próprias características com relação às perdas.

2.2. AS ESTRUTURAS DE AÇO COMO ALTERNATIVA

A construção em estruturas metálicas pode ser vista como uma alternativa ao concreto pois possui algumas vantagens citadas por Bellei (2010). Pode-se aqui destacar os seguintes itens:

- Estrutura mais leve e esbelta provocando um alívio nas fundações;
- Possibilidade de vãos maiores;
- Maior precisão nas dimensões;
- Menor tempo de execução; e
- Processo construtivo mais eficiente por se tratar de estruturas pré-fabricadas diminuindo assim os riscos e prejuízos na execução in loco.

Analisando esses aspectos, é possível notar que essa técnica construtiva se destaca por suas características benéficas tanto do ponto de vista construtivo como sustentável, ainda mais se tratando de grandes vãos.

Dentre todos os aspectos particulares das estruturas metálicas, o que mais se destaca em relação aos outros sistemas construtivos é a reciclabilidade. Em caso de necessidade de demolição, a estrutura metálica pode ser desmontada e reaproveitada em outro local da mesma forma. Como outra alternativa, pode ser transformada em matéria prima novamente, dando origem à novos perfis, sem perda de qualidade, ou mudanças significativas na integridade do material que impeçam sua aplicação para fim estrutural.

Ainda de acordo com Bellei (1998), a utilização de estruturas metálicas também promove uma maior limpeza na obra no período da execução, isso implica que a produção de lixo ou entulho proveniente da estrutura é praticamente nula. Algo contrastante, se compararmos com as estruturas de concreto que necessitam das escoras e formas, geralmente de madeira. Peças que podem ser reutilizadas algumas vezes, entretanto, dado determinado ciclo, são descartadas e se tornam entulho na obra.

2.2.1. PERFIS DOBRADOS E PERFIS LAMINADOS

Existem basicamente dois tipos de perfis, os dobrados e os laminados, ou em outras palavras, os formados a frio e os formados a quente. Isso remete diretamente à forma como são fabricadas as peças, o que será exposto a seguir no tópico que detalha o processo de fabricação.

De acordo com Javaroni (2015), os perfis formados a frio alcançaram lugar de destaque principalmente em obras de pequeno e médio porte quando se trata de estruturas metálicas. Por serem obtidos através do dobramento de chapas finas e planas, possuem boa relação massa/resistência e podem ser conformados em uma grande variedade de formatos e seções. O autor ainda aponta um ganho de resistência à tração devido ao aumento da tensão de escoamento da peça se comparados os perfis dobrados com aços virgens.

Embasando-se nessas vantagens da utilização de estruturas de aço, e mais especificamente, dos perfis formados a frio, nota-se que implantação desse sistema construtivo seria um grande avanço para a construção civil. Constituinto um passo importante rumo à diminuição de entulho na obra e da promoção de uma construção sustentável e reciclável.

Há uma desvantagem a ser listada ocasionada por uma pequena parcela de perda de material mostrada no Item 3.5. Isso ocorre ainda no processo de fabricação das peças, onde as chapas provenientes das bobinas são dobradas dando origem aos perfis formados a frio. Esses fragmentos de chapa podem ser conduzidos novamente à metalúrgica para serem processados e se tornar novamente uma chapa. Contudo, ainda é possível eliminar o gasto de energia com transporte em conduzir esses fragmentos para realizar o processo de reciclagem. Um simples ajuste racional nas dimensões dos perfis de catálogo pode fazer com que projeto estrutural e corte das chapas sejam compatibilizados. Se as dimensões de corte de cada um dos perfis forem múltiplas da dimensão da chapa, o corte será exato, promovendo o aproveitamento por completo da bobina de aço.

2.2.2. FABRICAÇÃO DOS PERFIS FORMADOS A FRIO

A fabricação dos perfis de aço moldado a frio recebe esse nome pois o processo acontece em temperaturas não suficientemente altas para ocasionar deformações na peça. Isso normalmente ocorre por meio de dois métodos mais difundidos. Javaroni (2015) cita a utilização de prensas dobradeiras e utilização de matrizes rotativas como meios de realizar a conformação das peças.

O primeiro, mais utilizado para moldagem de perfis tipo “U” e “Z” consiste em uma máquina que executa as operações de dobramento em chapas já previamente cortadas. Essa máquina conta com uma barra que se desloca verticalmente empurrando a chapa a ser dobrada contra uma matriz localizada na base. Dessa forma, a fabricação de diferentes seções transversais depende da seleção de uma matriz de base adequada. É possível observar na Figura 1 o maquinário utilizado para realização da dobra do aço descrito por Javaroni (2015).

Figura 1 – Prensa hidráulica utilizada na conformação de perfis dobrados.



Fonte: Javaroni, (2015).

O segundo método apontado pelo mesmo autor é o das matrizes rotativas, que consiste na conformação contínua das peças a partir de bobinas laminadas de aço. O equipamento é composto por rolos associados em série de modo a conformar a chapa proveniente da bobina no formato desejado. As peças precisam ser cortadas de acordo com as dimensões especificadas. Esse método tem maior rendimento em relação ao tempo, todavia, é mais utilizado na obtenção de telhas onduladas como se observa na Figura 2.

Figura 2 – Perfiladeira de bobinas laminadas com matrizes rotativas.



Fonte: Site da empresa Wakamatsu, (2019).

Silva e Silva (2008) apontaram algumas características desses dois métodos de dobra do aço. O processo que se utiliza da prensa hidráulica é chamado de descontínuo enquanto o processo obtido através das matrizes rotativas é denominado contínuo. Portanto, a primeira técnica de dobra seria mais recomendada para produção em pequena

e média escala, ao passo que a segunda, para larga escala. Também é apontado que o método descontínuo tem como limitação de comprimento a maior dimensão da prensa, enquanto o método contínuo pode ser feito em comprimentos maiores.

Ambos os autores citam que nos dois processos mais usuais faz-se necessário o corte das peças. No sentido longitudinal, isso ocorre para atender às especificações arquitetônicas de projeto, tais como, vão livre, dimensões em planta e pé direito. Já no sentido transversal da seção, isso ocorre para atender às especificações estruturais, tais como, área de aço, momento de inércia e resistência a flambagem. O produto restante desse corte, geralmente não possuindo dimensões próprias para a utilização como perfil, é descartado pelo custo para se realizar a reciclagem do aço (Silva; Silva,2008).

2.2.3. PERFIS CATALOGADOS

A Norma NBR6355/2012 (ABNT, 2012), estabelece um padrão de perfis formados a frio, com diversas espessuras de chapa, indicando características geométricas dos perfis, além de padronizar a nomenclatura utilizada.

Devido a esse fato, a maioria dos fabricantes de estruturas metálicas do Brasil utilizam perfis de catálogo padronizados. Isso implica que para diferentes espessuras de chapa, as dimensões de seção das peças não são reajustadas. Como exemplo dessa prática, podemos citar empresa Arcelor Mittal cujos catálogos de perfis “U” e “U” enrijecido constam nas Tabelas 3 e 4 a seguir, respectivamente.

Tabela 3 – Catálogo de perfis “U” da empresa Arcelor Mittal, pesos em kg/6m

Dimensões (mm)	Espessura (mm)							
	2,00	2,25	2,65	3,00	3,25	3,75	4,25	4,75
45 x 17	6,69	7,42	8,49	9,47				
50 x 25	8,67	9,64	11,1	12,4	13,7	15,0	16,6	18,1
68 x 30	11,3	12,6	14,6	16,4	18,1	20,0	22,2	24,4
75 x 40	13,8	15,5	18,0	20,2	22,4	24,7	27,6	30,4
92 x 30	13,6	15,2	17,6	19,8	21,9	24,2	27,0	29,8
98 x 25	13,2	14,7	17,1	19,2	21,1	23,5	26,2	28,9
100 x 40	16,2	18,1	21,1	23,7	26,4	29,1	32,6	36,0
100 x 50	18,1	20,2	23,6	26,6	29,5	32,7	36,6	40,5
120 x 30	16,2	18,1	21,1	23,7				
120 x 40	18,1	20,2	23,6	26,6	26,4	29,1	32,6	36,0
127 x 50	20,6	23,1	27,0	30,4	33,8	37,4	42,0	46,5
150 x 50	22,8	25,5	29,8	33,6	37,4	41,5	46,6	51,7
150 x 60	24,7	27,7	32,3	36,5	40,6	45,0	50,6	56,2
200 x 50	27,5	30,8	36,1	40,7	45,3	50,3	56,6	62,9
200 x 75	32,2	36,1	42,3	47,8	53,2	59,2	66,7	75,1
300 x 75	41,6	46,7	54,8	61,9	69,0	76,8	86,7	96,4

Fonte: Site da empresa Arcelor Mittal (Adaptada pelo autor).

Tabela 4 - Catálogo de perfis “U” enrijecidos da empresa Arcelor Mittal, pesos em kg/6m

Dimensões (mm)	Espessura (mm)							
	2,00	2,25	2,65	3,00	3,25	3,75	4,25	4,75
50 x 25 x 10	9,8	10,8	12,7	14,4	14,7	15,9	17,2	18,3
70 x 40 x 17	15,4	17,5	19,8	22,2				
75 x 25 x 15	13,1	14,5	16,7	18,9				
75 x 40 x 15	15,9	17,7	20,5	23,2	24,9	27,4	30,2	32,9
90 x 60 x 20	22,0	24,6	28,6	31,9				
100 x 40 x 15	18,3	20,3	23,7	26,8	28,9	32,7	35,2	38,5
100 x 50 x 17	20,5	22,9	26,7	30,2	32,7	36,0	40,0	43,9
127 x 25 x 15	18,0	20,0	23,2	26,3				
127 x 50 x 17	23,1	25,8	30,0	33,9	36,9	40,8	45,4	49,9
150 x 50 x 17	25,2	28,2	33,0	37,3	40,6	44,9	50,0	55,0
150 x 60 x 20	27,7	30,9	36,1	40,7	44,7	49,5	55,2	60,9
200 x 75 x 25	35,9	40,3	46,9	53,1	58,9	65,4	73,3	81,0
210 x 30 x 15	26,8	29,9	34,8	39,0	43,1	47,7	53,2	58,6
250 x 75 x 25	40,5	45,6	52,9	59,9	66,7	74,2	83,3	92,2
300 x 75 x 25	45,0	50,7	59,4	67,3	74,6	83,4	94,1	105,2

Fonte: Site da empresa Arcelor Mittal (Adaptada pelo autor).

A empresa Arcelor Mittal também utiliza bobinas de aço com as seguintes dimensões para a fabricação das peças:

- Espessura (mm): 1,50 – 1,80 – 2,00 – 2,25 – 2,65 – 3,00 – 3,35 – 3,75 – 4,25 – 4,50 – 4,75
- Largura (mm): 1.000 – 1.200 – 1.500 – 1.800
- Comprimento (mm): 2.000 – 3.000 – 6.000 – 12.000

2.2.4. EQUAÇÃO DA LARGURA DE CORTE

É possível notar a incompatibilidade existente entre o catálogo de perfis com as bobinas de chapa, pois as dimensões de corte dos perfis não são múltiplas inteiras das dimensões de largura das chapas utilizadas. O material que sobra por ocasião do corte é considerado como perda e geralmente descartado. Entretanto, a utilização das larguras nominais das chapas em combinação com a espessura desejada possibilita a realização de um cálculo que anula a perda supracitada.

A equação que permite o cálculo da dimensão transversal de corte em função na espessura da chapa pode ser obtida através de algumas manipulações algébricas nas expressões das características geométricas dos perfis. Essas equações podem ser encontradas no anexo A da NBR 6355/2012 (ABNT, 2012).

$$D_c = P - 1,65 \cdot n \cdot e \quad (1)$$

D_c → Dimensão de corte (mm)

P → Perímetro (mm)

n → Número de dobras

e → Espessura (mm)

O perímetro da peça é facilmente obtido pela soma das dimensões nominais dos perfis, a espessura da chapa utilizada consta nos catálogos e o número de dobras depende do tipo de perfil escolhido. Exemplificando para os perfis cantoneira ($n=1$), “U” ($n=2$) e “U” enrijecido ($n=4$).

2.2.4.1. EXEMPLO DE APLICAÇÃO DA FÓRMULA

É possível constatar a eficácia da equação utilizando-a para calcular o peso por metro de cada perfil. O valor obtido pode ser comparado com o informado no catálogo ou com o valor que consta na NBR 6355/2012 (ABNT, 2012). A expressão que calcula o peso por metro de um perfil metálico está no Item 4.4 da NBR7480/2007 (ABNT, 2007), segundo a norma, o peso deve ser calculado pelo produto entre o peso específico do aço (7850 kg/m^3) e a área da seção transversal.

$$Pm = \gamma_{aço} \cdot D_c \cdot e \quad (2)$$

$P_m \rightarrow$ Peso por metro (kg/m)

$D_c \rightarrow$ Dimensão de corte (m)

$\gamma_{aço} \rightarrow$ Peso específico do aço (kg/m³)

$e \rightarrow$ Espessura (m)

A Tabela A.2. da NBR 6355/2012 (ABNT, 2012) mostra que o perfil “U” 150x50x2 possui um valor de peso por metro de 3,82 kg/m. Pode-se chegar facilmente a esse valor utilizando as equações (1) e (2).

$$D_c = P - 1,65 \cdot n \cdot e = (0,15 + 0,05 + 0,05) - 1,65 \cdot 2 \cdot 0,002 = 0,2434 \text{ m}$$

$$P_m = \gamma_{aço} \cdot D_c \cdot e = 7850 \cdot 0,2434 \cdot 0,002 = 3,82 \text{ kg/m}$$

Ainda utilizando as fórmulas para um outro tipo de perfil, podemos tomar como exemplo o “U” enrijecido 200x100x25x3 a apresenta peso por metro de 10,13 kg/m na mesma tabela citada anteriormente.

$$D_c = P - 1,65 \cdot n \cdot e = (0,2 + 2 \cdot 0,1 + 2 \cdot 0,025) - 1,65 \cdot 4 \cdot 0,003 = 0,4302 \text{ m}$$

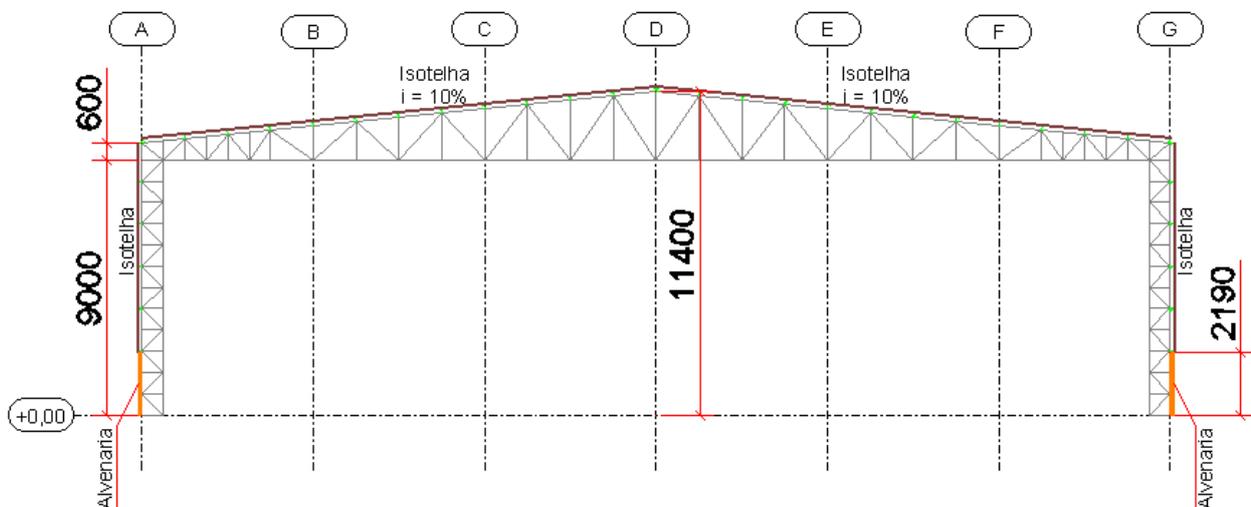
$$P_m = \gamma_{aço} \cdot D_c \cdot e = 7850 \cdot 0,4302 \cdot 0,003 = 10,13 \text{ kg/m}$$

3 METODOLOGIA

3.1. ESTUDO DE CASO EM UM GALPÃO DE ESTRUTURA METÁLICA

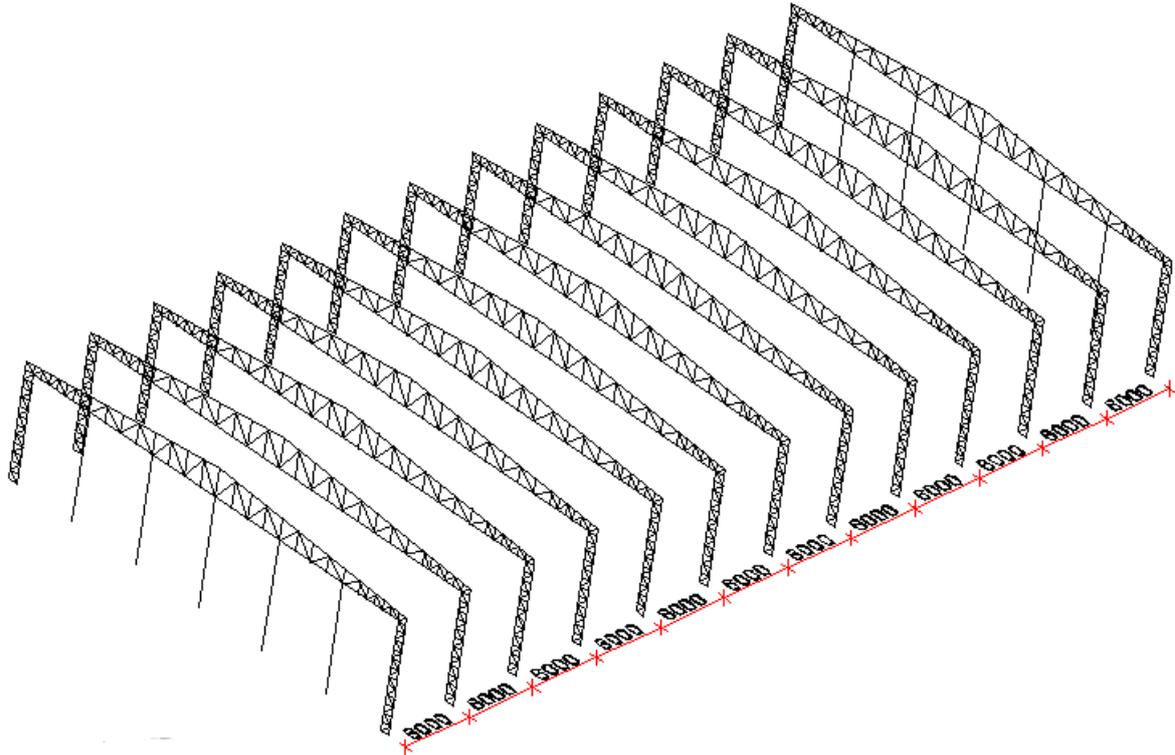
Para que se possam estabelecer índices percentuais na economia de aço será feito um estudo de caso. A estrutura a ser dimensionada será um galpão fictício feito em estrutura de aço com planta retangular, telhado em duas águas, com pórticos treliçados e perfis formados a frio. As Figuras 3 e 4 ilustram a edificação, mostrando o fechamento metálico, os vãos, dimensões em corte e em planta respectivamente.

Figura 3 – Corte transversal da edificação (unidades em “mm”)



Fonte: Autoria própria, (2019).

Figura 4 – Unifilar 3D estrutura principal (unidades em “mm”)



Fonte: Autoria própria, (2019).

O galpão fictício terá as dimensões de 36m x 72m, com distância entre os pórticos de 6m. O pé direito será de 9m e a inclinação do telhado de 10%. Para a cobertura e para as vedações laterais adotaremos Isotelha EPS termoacústica para o cálculo da carga permanente. Serão consideradas as características do local compatíveis com a cidade de Dourados-MS, onde o relevo é considerado plano e a velocidade básica do vento segundo o mapa das isopletas que consta na Figura 1 da NBR6123/1988 fica em torno de 48m/s (ABNT, 1998).

O dimensionamento se dará de duas formas diferentes: o método tradicional que leva em conta apenas os perfis catalogados e o método proposto que visa compatibilizar os perfis com a largura da chapa escolhida. Ao final dessas duas etapas pode-se comparar grandezas como o peso de aço total da estrutura e o total em aço economizado nos cortes.

3.1.1. CONCEPÇÃO ESTRUTURAL

A estrutura principal é composta por pórticos treçados formados por elementos em perfil dobrado “U” enrijecido. Os pórticos treçados são apoiados na base, espaçados entre si em 6,0 m e vencendo vãos típicos de 36,0 m. A cobertura será duas águas com inclinação 10,0%.

A estrutura secundária da cobertura é composta por terças em perfil “U” enrijecido, consideradas como vigas bi-apoiadas, vencendo vãos de 6,0 m entre os pórticos. Os pilares

de oitão são compostos por perfis caixão rotulados na base e no topo distantes a cada 6,0 m. A estrutura de fechamento lateral é composta por terças em perfil “U” enrijecido, bi-apoiadas, vencendo vãos de 6,0 m.

A cobertura da edificação será Isotelha EPS com espessura de 30 mm, vencendo vãos típicos de 1,51 m para a cobertura. Para o fechamento lateral, as telhas vencerão um vão livre de 1,50 m. O fechamento lateral será feito em alvenaria até os 2,19 m de altura e o restante em Isotelha.

Na direção transversal a estabilidade é promovida pelos pórticos e na direção longitudinal pelo sistema de contraventamentos (barras redondas) no banzo superior e inferior das tesouras e nas paredes laterais, agulhas (barras redondas) e vigas de travamento (perfil caixa formado por perfis “U” enrijecido dobrado) no banzo inferior das tesouras.

3.2. ESPECIFICAÇÕES DOS MATERIAIS E NORMAS UTILIZADAS

Embora o dimensionamento das peças não seja o objetivo em si do trabalho, esse processo precisa ser feito para se chegar à comparação entre os resultados. Para isso, os tipos de materiais considerados foram o aço estrutural Civil-300 ($f_y = 300$ Mpa) para os perfis formados a frio e aço ASTM-A36 ($f_y = 250$ Mpa) para as barras redondas de contraventamento.

O auxílio de softwares foi utilizado para o cálculo de ações, dimensionamento e quantificação de materiais, destaca-se o STRAP – dimensionamento dos perfis; EXCEL – cálculos quantitativos e análise estatística e o AUTOCAD – desenho e representação gráfica da estrutura.

Os procedimentos adotados no dimensionamento da estrutura foram extraídos da normativa vigente.

3.3. AÇÕES CONSIDERADAS PARA O DIMENSIONAMENTO

3.3.1. AÇÕES GRAVITACIONAIS

O peso próprio das estruturas será denotado pela sigla “PP” e as ações permanentes que podem vir a sofrer adição de peso in loco serão denotadas pela sigla “AP”.

- Peso Próprio do pórtico – Gerado pelo Software (PP);
- Peso próprio das terças e contraventamentos – 7 kgf/m² (PP);
- Isotelha EPS com espessura de 30 mm – 9,5 kgf/m² (AP);
- Demais instalações – 15 kgf/m² (AP).

O peso próprio das terças e contraventamentos adotado foi obtido de acordo com Javaroni (2015) e as ações provenientes das telhas foram extraídas do catálogo da empresa Isoeste.

3.3.2. SOBRECARGA (SC)

Sobrecarga de 25,0 kgf/m² aplicada sobre a cobertura segundo o recomendado pela NBR 8800/2008 no Anexo B item 5.1 (ABNT, 2008).

3.3.3. AÇÃO DO VENTO

Calculando os coeficientes S1, S2 e S3 de acordo com a NBR6123/1988 (ABNT,1998) obtivemos os seguintes valores de velocidade característica e de pressão dinâmica.

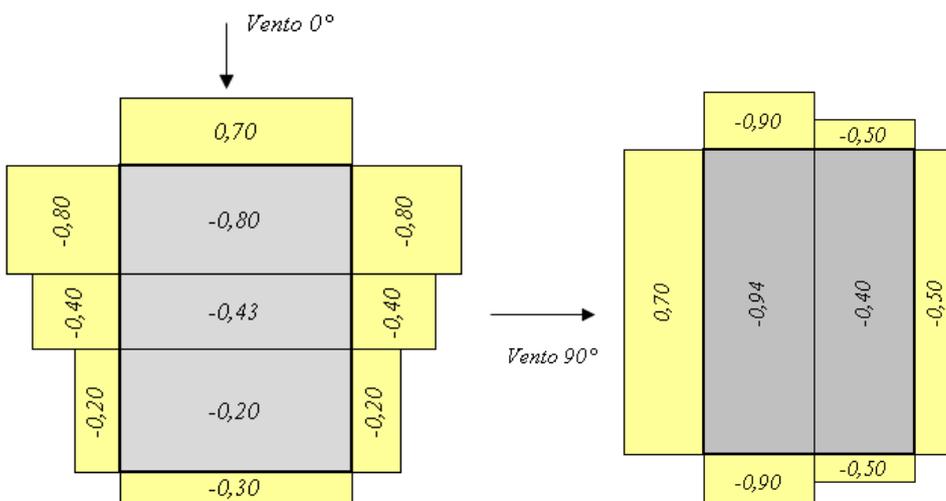
Tabela 5 – Valores de velocidade básica do vento (Vk) e pressão dinâmica (Pdin)

Vk (m/s)	Pdin (kgf/m ²)
43,65	116,82

Fonte: Autoria própria, (2019).

Os coeficientes de pressão externa são obtidos através das dimensões da obra. Aplicando esses valores as Tabelas 4 e 5 da NBR6123/1988 (ABNT, 1988) obtém-se os coeficientes nas paredes e na cobertura para os ventos aplicados a 0° e 90° na estrutura respectivamente. Os coeficientes foram dispostos esquematicamente na representação da estrutura em planta na Figura 5.

Figura 5 – Coeficientes de pressão externa nas paredes e cobertura

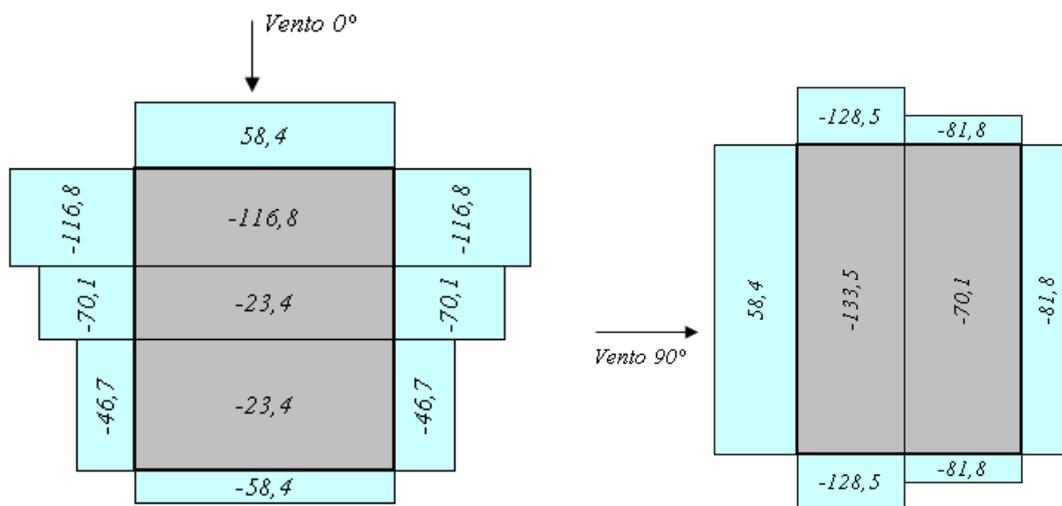


Fonte: Autoria própria, (2019).

Seguindo as orientações da NBR6123/1998 no item 6.2.5 (ABNT, 1988), o galpão foi considerado em uma categoria específica: duas faces opostas igualmente permeáveis e as outras faces impermeáveis, sendo assim, deve-se considerar para vento perpendicular a uma face permeável o coeficiente de pressão interna de sobrepressão ($c_{pi1} = + 0,2$); e para vento perpendicular a uma face impermeável o coeficiente de pressão interna de sucção ($c_{pi2} = - 0,3$).

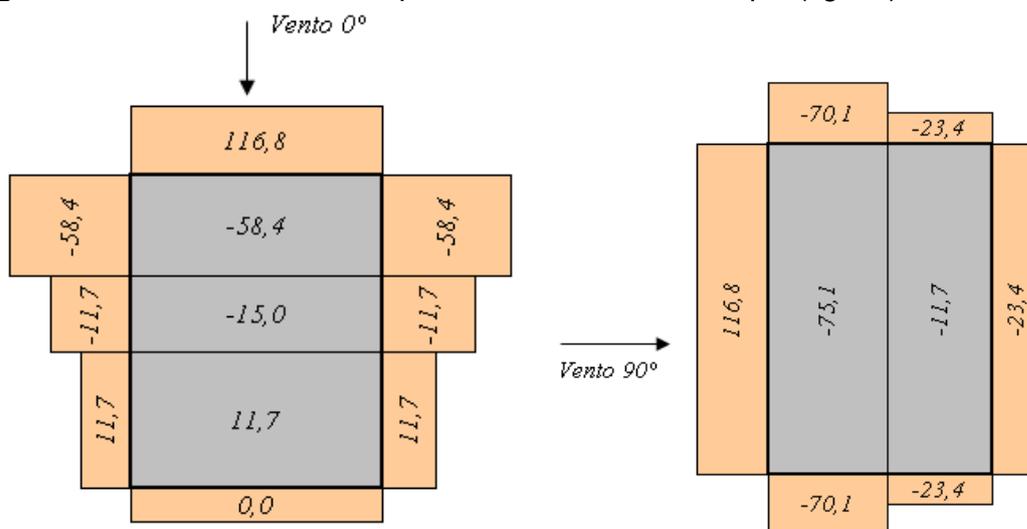
Combinando os coeficientes de pressão interna, externa e a pressão dinâmica, obtemos os carregamentos estáticos por metro quadrado nas paredes e na cobertura devido ao vento mostrados nas Figuras 6 e 7.

Figura 6 – Pressão estática nas paredes e cobertura com c_{pi1} (kgf/m²)



Fonte: Autoria própria, (2019).

Figura 7 – Pressão estática nas paredes e cobertura com c_{pi2} (kgf/m²)



Fonte: Autoria própria, (2019).

3.4. COMBINAÇÕES

Analisando as cargas calculadas e utilizando os coeficientes de ponderação de ações que constam na NBR8800/2008 nos itens 4.7.6.2 e 4.7.7.3 (ABNT, 2008), é possível destacar as combinações últimas mais críticas que devem ser utilizadas no dimensionamento, conforme as Tabelas 6, 7 e 8.

Tabela 6 – Combinações últimas segundo a NBR8800/2008

Combinação	PP	AP	SC	V
1	1,25	1,40	1,50	
2	1,25	1,40	1,50	1,4x0,6
3	1,25	1,40	1,5x0,8	1,40
4	1,00	1,00		1,40

Fonte: Autoria própria, (2019).

Tabela 7 – Combinações de serviço segundo a NBR8800/2008

Combinação	PP	AP	SC	V
1	1,00	1,00	0,70	
2	1,00	1,00	0,60	0,30
3	1,00	1,00		0,30

Fonte: Autoria própria, (2019).

Tabela 8 – Combinações para flecha nas terças segundo a NBR8800/2008 (Anexo C)

Combinação	PP	AP	SC	V
1	1,00	1,00	1,00	
2				1,00

Fonte: Autoria própria, (2019).

3.5. CÁLCULO DA PERDA DE AÇO NO CORTE

Para os perfis catalogados foi quantificada a perda de aço em toda a estrutura fazendo-se os seguintes procedimentos:

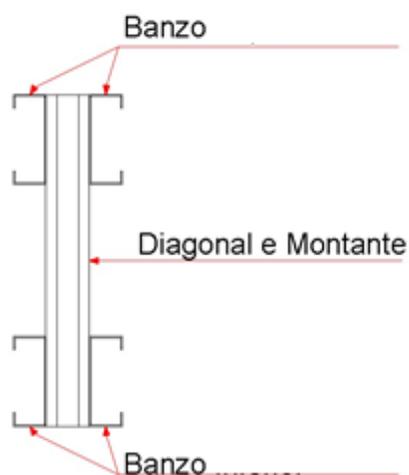
- Determinação do corte da peça através da Equação 1.
- Cálculo no número de perfis que se pode tirar de uma chapa de 1200mm, fazendo o corte dividido por 1200mm e arredondando abaixo para valor inteiro.
- A perda é obtida fazendo o 1200mm menos a o corte multiplicado pelo número de cortes.
- A perda em massa foi calculada fazendo a perda em “mm” multiplicada pelo comprimento necessário do perfil, multiplicado por sua espessura, esse volume foi multiplicado pela densidade do aço (7850 kg/m³) obtendo assim o valor desejado.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DO DIMENSIONAMENTO DA ESTRUTURA

Para os banzos inferior e superior das treliças foram utilizados dois perfis “U” enrijecido com 200mm de altura espaçados de 100mm. Nesse espaçamento previsto encaixam-se as diagonais e montantes, que são constituídos de perfis “U” enrijecido da família de 100mm de altura. Nos casos em que o esforço nas diagonais e montantes ultrapassava o limite dessas peças adotou-se dois perfis de mesmo tipo soldados posicionados de costas. A figura 8 ilustra a disposição dos perfis no dimensionamento do pórtico.

Figura 8 – Disposição dos perfis na tesoura e dos pilares.



Fonte: Autoria própria, (2019).

O dimensionamento da estrutura com os perfis de catálogo contidos nas Tabelas 3 e 4 considerando a geometria e os esforços apresentados resultou na seguinte lista de materiais descrita na Tabela 9:

Tabela 9 – Lista de materiais resultante do dimensionamento com base nos perfis catalogados.

ITEM	DESCRIÇÃO	PERFIS	MATERIAL	COMPR. (m)	PESO (kg/m)	PESO (kg)
1	TESOURA	UE 100 X 50 X 17 X 2,00	CIVIL-300	56,71	3,47	196,59
2		UE 100 X 50 X 17 X 3,00	CIVIL-300	13,00	5,04	65,58
3		UE 100 X 50 X 17 X 3,75	CIVIL-300	42,65	6,16	262,72
4		UE 200 X 75 X 25 X 2,00	CIVIL-300	24,60	6,07	149,39
5		UE 200 X 75 X 25 X 3,75	CIVIL-300	120,36	11,05	1329,55
6	PILAR	UE 100 X 50 X 17 X 2,00	CIVIL-300	38,15	3,47	132,25
7		UE 100 X 50 X 17 X 3,00	CIVIL-300	5,30	5,04	26,74
8		UE 200 X 75 X 25 X 2,00	CIVIL-300	54,00	6,07	327,93
9		UE 200 X 75 X 25 X 3,75	CIVIL-300	18,00	11,05	198,84
TOTAL POR PÓRTICO:				372,77	57,42	2689,57
TOTAL:				4846,0	746,5	34964,4
10	TERÇAS COBERTURA	UE 200 X 75 X 25 X 2,00	CIVIL-300	1872	6,07	11368,21
11	TERÇAS LATERAIS	UE 200 X 75 X 25 X 2,00	CIVIL-300	1017	6,07	6176,00
12	VIGAS DE TRAVAMENTO	UE 200 X 75 X 25 X 2,00	CIVIL-300	168	6,07	1020,22
13	PILAR DE OITÃO	UE 300 X 75 X 2,5 X 4,75	CIVIL-300	162	17,47	2830,92
14	CORRENTE RÍGIDA	U 50 X 50 X 2,0	CIVIL-300	1276,3	2,25	2873,44
15	FRECHAL	FR 12,5	A36	180	0,98	175,61
16	CONTRAVENTAMENTO	FR 16,0	A36	914,5	1,60	1461,78
17	AGULHA	FR 12,5	A36	420	0,98	409,76
EST. SECUNDÁRIAS:				6009,8	41,5	26315,9
TOTAL GERAL:				10855,8	788,0	61280,3

Fonte: Autoria própria, (2019).

O dimensionamento com os perfis propostos de corte exato resultou na seguinte lista de materiais descrita na Tabela 10:

Tabela 10 – Lista de materiais resultante do dimensionamento com os perfis de corte exato.

ITEM	DESCRIÇÃO	PERFIS	MATERIAL	COMPR. (m)	PESO (kg/m)	PESO (kg)
1	TESOURA	UE 100 X 50 X 26 X 2,00	CIVIL-300	96,77	3,75	362,81
2		UE 100 X 50 X 29 X 3,00	CIVIL-300	24,63	5,61	138,16
3		UE 200 X 70 X 36 X 2,00	CIVIL-300	26,40	6,26	165,29
4		UE 200 X 70 X 38 X 2,65	CIVIL-300	48,12	8,29	398,92
5		UE 200 X 70 X 40 X 3,00	CIVIL-300	72,24	9,42	680,84
6	PILAR	UE 100 X 50 X 26 X 2,00	CIVIL-300	41,33	3,75	154,95
7		UE 100 X 50 X 29 X 3,00	CIVIL-300	2,12	5,61	11,89
8		UE 200 X 70 X 36 X 2,00	CIVIL-300	54,00	6,26	338,10
9		UE 200 X 70 X 38 X 2,65	CIVIL-300	18,00	8,29	149,22
TOTAL POR PÓRTICO:				383,61	57,24	2400,19
TOTAL GERAL:				4986,9	744,2	31202,5
10	TERÇAS COBERTURA	UE 200 X 70 X 36 X 2,00	CIVIL-300	1872	6,26	11720,89
11	TERÇAS LATERAIS	UE 200 X 70 X 36 X 2,00	CIVIL-300	1017	6,26	6367,60
12	VIGAS DE TRAVAMENTO	UE 200 X 70 X 36 X 2,00	CIVIL-300	168	6,26	1051,87
13	PILAR DE OITÃO	UE 300 X 100 X 62 X 3,75	CIVIL-300	162	17,64	2857,75
14	CORRENTE RÍGIDA	U 50 X 45 X 2,0	CIVIL-300	1276,3	2,17	2773,25
15	FRECHAL	FR 12,5	A-36	180	0,98	175,61
16	CONTRAVENTAMENTO	FR 16,0	A-36	914,5	1,60	1461,78
17	AGULHA	FR 12,5	A-36	420	0,98	409,76
EST. SECUNDÁRIAS:				6009,8	42,1	26818,5
TOTAL GERAL:				10996,7	786,3	58021,0

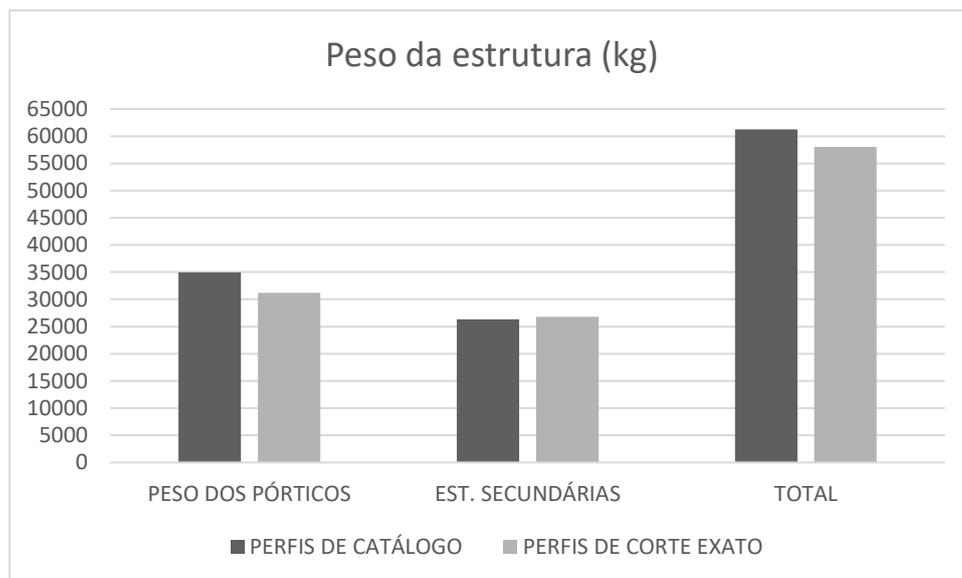
Fonte: Autoria própria, (2019).

Para que as devidas comparações pudessem ser feitas, foram utilizados perfis das mesmas famílias do dimensionamento com os perfis de catálogo sendo esses de 100, 200 e 300 mm de altura. O corte de cada uma das peças foi calculado utilizando a Equação 1 de modo a obter um valor múltiplo exato de 1200 mm, que é a largura da chapa comercial adotada.

4.2. ANÁLISE DA ESTRUTURA MAIS LEVE

É possível notar que o dimensionamento com perfis de catálogo gerou um pórtico 289 kg mais pesado em comparação com os perfis otimizados, considerando todos os pórticos esse valor chega a 3,7 toneladas, o equivalente a 11% do peso total dos pórticos. Analisando a estrutura como um todo, peças principais e secundárias, chega-se a uma diferença absoluta entre o peso da estrutura total na ordem de 3,2 toneladas. O que implica em uma redução de aproximadamente 5% do peso. O comparativo entre o peso da estrutura nos dois casos foi ilustrado na Figura 9.

Figura 9 – Comparativo entre o peso com perfis de catálogo e de corte exato.



Fonte: Autoria própria, (2019).

Analisando o pórtico principal (Tesoura e Pilar treliçado) é possível observar que na Tabela 7 um dos perfis que mais contribui com o peso da tesoura é o UE200x75x25x3,75 com peso linear de 11,05 kg/m. O perfil correspondente a esse no dimensionamento otimizado é o UE200x70x40x3,00 com 9,42 kg/m de peso linear. Nesse caso, houve um aumento na aba externa do perfil, aumentando assim a sua inércia. Isso fez com que a espessura de aço utilizada pudesse ser reduzida o que justifica a diferença no peso final.

O perfil utilizado nas terças de cobertura e de vedação também influencia incisivamente no peso total da estrutura devido ao fato de que estes representam os maiores comprimentos.

Buscando uma comparação do dimensionamento feito com a literatura, é possível conferir se o dimensionamento foge ao esperado. Segundo Neto (2007), as estruturas metálicas para cobertura podem ser consideradas leves quando têm um peso que varia de 10 a 20 kg/m². Somando os pesos dos elementos da tesoura de cobertura, terças e contraventamentos e dividindo pela área em planta da obra (36m x 72m) chega-se a um peso de 15 kg/m² para o dimensionamento otimizado e 15,8 kg/m² para o dimensionamento com os perfis de catálogo. Isso indica que a segunda estrutura calculada, ainda que leve, atende perfeitamente as expectativas dimensionais da literatura para obras desse tipo.

4.3. ANÁLISE DA REDUÇÃO DE PERDAS

A Tabela 11 contém os valores de perdas calculados em cada um dos perfis de catálogos utilizados no dimensionamento.

Tabela 11 – Cálculo da perda de aço para cada um dos perfis de catálogo

PERFIS	CORTE	Nº CORTES	PERDA (mm)	L (m)	N de chapas	PERDA (kg)
UE 100 X 50 X 17 X 2,00	221	5	96	94,86	8	143,0
UE 100 X 50 X 17 X 3,00	214	5	129	18,30	2	55,6
UE 100 X 50 X 17 X 3,75	209	5	154	42,65	4	193,0
UE 200 X 75 X 25 X 2,00	387	3	40	78,60	7	48,9
UE 200 X 75 X 25 X 3,75	375	3	74	138,36	12	302,4
TOTAL POR PÓRTICO						743
TOTAL:						9658
UE 200 X 75 X 25 X 2,00	387	3	40	3057	255	1900,6
UE 300 X 75 X 25 X 4,75	469	2	263	162	14	1586,9
U 50 X 50 X 2,0	143	8	53	1276,3	107	1058,0
EST. SECUNDÁRIAS						4545
TOTAL GERAL:						14203

Fonte: Autoria própria, (2019).

A estrutura calculada com perfis otimizados de corte exato não só resultou em uma estrutura mais leve, mas também evitou o desperdício de aço no processo de fabricação das peças. Na Tabela 11 constam os valores de perda de material. Vê-se que para o perfil utilizado nas terças de cobertura e terças de fechamento o desperdício seria da ordem de 1,9 toneladas de aço. O desperdício de aço por pórtico ficaria em torno de 0,7 tonelada, levando em consideração a obra como um todo, seriam perdidos por ocasião do corte um montante de 14 toneladas de material considerando que não há mecanismos compensação de material.

Como a estrutura analisada é de grandes dimensões, a perda se mostrou bem aguda. A quantidade de material proveniente do corte representa 22% de todo o aço

utilizado na obra. Esse é um dado alarmante pois representa que se não forem tomadas medidas de compensação, a cada cinco obras desse porte, se perde a quantidade de material suficiente para fazer uma nova.

De acordo com Bellei (1998), a fabricação de uma estrutura metálica representa de 20 a 40% do custo total da obra, o material e os insumos representam de 20 a 50%. Em contrapartida o projeto fica entre 1 a 3%. Isso implica que as alterações propostas no processo de dimensionamento influem diretamente em áreas que são gargalos nas estruturas metálicas: a fabricação e o custo do material. Tendo isso como base, infere-se que a utilização dos perfis propostos visando a redução do desperdício indiretamente também possibilitaria uma economia na quantidade de material adquirida, e em uma economia por parte da metalúrgica responsável pela dobra.

5 CONCLUSÃO

O desperdício de material em canteiros de obras é um tema de suma importância devido à quantidade de insumos que a construção civil movimenta. Em se tratando de estruturas de aço é possível notar algumas vantagens em relação ao modelo mais comum feito com estruturas de concreto. Porém, o processo de cálculo proposto nesse trabalho buscou otimizar os perfis de modo a obter um corte exato e evitar o desperdício de aço ainda no processo de fabricação.

Após o dimensionamento da estrutura pôde-se constatar que houve uma redução de 5% no peso da estrutura para resistir às mesmas cargas e com a mesma geometria. Isso se deve ao fato de que quando o engenheiro tem a possibilidade de escolher todas as dimensões dos perfis é possível adotar perfis intermediários aos de catálogo, que tenham corte exato e que promovam uma utilização de 100% na capacidade resistente do aço estrutural. Por conseguinte, a redução no peso total provoca alívio de esforços no solo, o que acarreta em fundações menos onerosas.

A utilização dos catálogos de perfis, preconizados pela NBR6355/2012 (ABNT, 2012), promove uma certa estagnação no dimensionamento, pois as escolhas de perfis são limitadas às opções do mercado. Quando se trabalha com chapas dobradas, tem-se a possibilidade de modelar os perfis para as dimensões necessárias determinadas pelo engenheiro, de modo a promover o aproveitamento máximo do material, tanto nas condições de segurança como no aspecto de desperdício.

O pórtico treliçado calculado com corte exato apresentou peso 289 kg mais leve, e evitou uma perda de 743 kg de material. Isso indica que a mesma geometria, solicitada com os mesmos esforços, após o processo de ajuste dos perfis, promoveu a economia de aço

de duas formas diferentes: reduziu a perda incorporada e a quantidade de aço descartada no corte.

Tendo como base os resultados deste trabalho, conclui-se que a revisão dos catálogos de perfis dobrados para perfis de corte exato promoveria benefícios para diversas áreas envolvidas na cadeia produtiva das estruturas metálicas: aos engenheiros, com maior liberdade para escolher as dimensões do perfil que atende exatamente as especificações; às companhias metalúrgicas tendo seu desperdício de material reduzido e consequentemente reduzindo o seu custo de produção e; cliente final, com uma estrutura mais leve, otimizada e igualmente segura.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus “porque dele, por Ele e para Ele são todas as coisas”. Aos meus familiares e a minha namorada Adrieli pelo apoio e incentivo. Agradeço também ao professor orientador Msc. Domingos Silva pelos conhecimentos passados, dedicação e empenho empregados na realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

ABCEM. **Site da Associação Brasileira em Estruturas Metálicas**. Disponível em: <<https://www.cbca-acobrasil.org.br>>. Acesso em: maio de 2019.

ARCELOR MITTAL. **Site da Empresa Arcelor Mittal**. Disponível em: <<https://brasil.arcelormittal.com/produtos-solucoes/catalogos>>. Acesso em: maio de 2019.

Alternativas para a Redução do Desperdício em Canteiros de Obras. Escola Politécnica da USP. São Paulo. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR7480 - Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado - Especificação**. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR8681 - Ações e segurança nas estruturas**. Rio de Janeiro, 1980.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR6120 - Cargas para o cálculo de estruturas de edificações**. Rio de Janeiro, 1980.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR14762 - Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio**. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR6123 - Forças devidas ao vento em edificações**. Rio de Janeiro, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR6355 - Perfis estruturais de aço formados a frio - Padronização**. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800 - Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. Rio de Janeiro, 2008.

BELLEI, I. H. **Galpões Industriais em Aço**. 6ª. ed. São Paulo: Pini, 2010.

ISOESTE. **Site da Empresa Kingspan-Isoeste**. Disponível em: <<https://kingspan-isoeste.com.br/catalogos>>. Acesso em: maio de 2019.

JAVARONI, C. E. **Estruturas de aço: Dimensionamento de Perfis Formados a Frio**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

MAYDL, P. Sustainable Engineering: State-of-the-art and Prospects. **Strutural Engineering International**, p. 176-180, 2004.

NETO, A. C. **Apostila de Estruturas Metálicas II**. Campinas. 2007.

PINTO, T. P. **Perda de materiais em processos construtivos tradicionais**. São Paulo: Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos, 1989.

SILVA, E. L.; SILVA, V. P. **Dimensionamento de perfis formados a frio segundo a NBR14672 e NBR6355**. Rio de Janeiro: Centro Brasileiro da Construção em Aço, 2008.

Otimização no corte de perfis metálicos dobrados com ênfase na redução de perdas

SOUZA, U. E. L. D. **Como Reduzir Perdas Nos Canteiros**: Manual de Gestão do Consumo de Materiais na Construção Civil. São Paulo: Pini, 2005.

WAKAMATSU. **Site da Empresa Wakamatsu**. Disponível em:
<http://wakamatsu.com.br/?page_id=735>. Acesso em: maio de 2019.