



Tema: oficial de submissão

## CONSTRUÇÃO MODULAR EM CAMPO DE ESTRUTURAS METÁLICAS

Luiz Francisco Scudelari de Macedo<sup>1</sup>

Rafael Scudelari de Macedo<sup>2</sup>

Flavio Rubin<sup>3</sup>

Debora Coting Braga<sup>4</sup>

Daniel Lepikson<sup>5</sup>

### Resumo

Este artigo aborda a Construção Modular em Campo (CMC) como uma alternativa de *construtibilidade* para montagem de estruturas metálicas de grande altura. Este método construtivo prevê a aplicação de conceitos relacionados à modularização/pré-montagem de estruturas com vistas à otimização do processo de montagem, as quais não tiveram seu projeto básico de Engenharia elaborado com base nesta premissa. Demonstra-se que, com pequenas intervenções, ainda é possível aplicar a técnica de CMC mesmo em fases avançadas do projeto de um Empreendimento, buscando-se assim auferir ganhos significativos advindos da melhor eficiência construtiva. Neste estudo, o método segundo a CMC é comparado ao método tradicional de montagem, através da aplicação idealizada de ambas as abordagens em uma estrutura existente. São apresentados e comparados os prazos para a conclusão da montagem seguindo as duas estratégias, bem como um debate sobre quesitos relevantes como segurança e consumo de recursos.

**Palavras-chave:** Construtibilidade; Modularização; Pré-montagens; Construção Metálica

### ON-SITE MODULARIZATION OF STEEL STRUCTURES

#### Abstract

This article discusses On-Site Modularization (OSM) as a constructability alternative for the assembly of steel structures of great height. This construction method applies concepts related to modularization/pre-assembling, aiming at optimizing the assembly process of structures, which did not have their basic design engineering developed based on this premise. It is shown that with small interventions, it is still possible to apply the OSM technique even in advanced stages of a project venture, seeking to reap significant gains from better constructive efficiency. In this study, the method of the OSM is compared to traditional methods of assembly through the idealized application of both approaches upon an existing structure. The schedules for both strategies are presented and compared, as well as a discussion on relevant issues such as safety and resource consumption.

**Keywords:** Constructability; Modularization; Pre-Assembly; Steel Construction

<sup>1</sup> Engenheiro Civil, sócio-diretor, Emasa Engenharia LTDA., Curitiba, Paraná, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheiro de Computação, sócio-diretor, Emasa Engenharia LTDA., Curitiba, Paraná, Brasil.

<sup>3</sup> Engenheiro Civil, Especialista em Estruturas, Engenheiro da equipe de Processos Construtivos/Engenharia Industrial, Construtora NORBERTO ODEBRECHT, São Paulo, São Paulo, Brasil.

<sup>4</sup> Engenheira Civil, Mestre em Engenharia Civil, Engenheira da equipe de Processos Construtivos/Engenharia Industrial, Construtora NORBERTO ODEBRECHT, São Paulo, São Paulo, Brasil.

<sup>5</sup> Engenheiro Mecânico e Civil, Mestre e Doutor em Engenharia Civil, Engenheiro da equipe de Processos Construtivos/Engenharia Industrial, Construtora NORBERTO ODEBRECHT, São Paulo, São Paulo, Brasil.

## 1. INTRODUÇÃO

Construtibilidade é, segundo a Força Tarefa de Construtibilidade do CII, *Constr. Industry Inst.*, citado por O' Connor e Davis [1], em tradução livre:

“... O uso otimizado de conhecimento em construção e experiência em planejamento, *design*, suprimentos e operações em campo para atingir os objetivos gerais do projeto.”

Em construções *off-shore*, por conta da inerente dificuldade de execução de trabalhos relacionados à montagem e instalação de estruturas de grande porte em mar aberto, estudos de construtibilidade são condicionantes para o sucesso do empreendimento. Neste setor, são forçosamente aplicadas as soluções construtivas que ampliam as atividades a serem realizadas em terra e a baixas alturas, *i.e.* próximas ao nível do terreno, por meio da segmentação ou pré-montagens de grande porte de partes da estrutura, para posterior instalação destes subconjuntos em sua posição definitiva.

Esta técnica traz grandes ganhos advindos da possibilidade de paralelismo de atividades, além de proporcionar também maior agilidade e segurança que decorrem da realização de trabalhos com os operários próximos ao nível do solo (O'Connor e Davis [1], Burke e Miller [2], Carter [3], Zolfagharian [4], e Jergeas e Van der Put [5]).

Por se tratar de uma parte substancial do conjunto que compõe a estrutura global, estes subconjuntos pré-montados isolados e estruturalmente estáveis são denominados “*Módulos*”. Neste documento é utilizado o termo *modulo* de acordo com a definição do *Cambridge Dictionaries Online* [6] como: “Uma de um conjunto de partes separadas que, quando combinadas, formam um todo completo”.

A BCSA (British Constructional Steelwork Association) [7] define Construção Modular como:

“O uso de unidades de construção produzidas em fábrica e pré-engenheiradas que são entregues ao sítio e montadas como componentes de grande volume ou como elementos substanciais de uma construção.”

Segundo Jergeas e Van der Put [5], a aplicação de construtibilidade (e, conseqüentemente, o conceito de *modularização*) em outros edifícios metálicos industriais é ainda embrionária. A aparente economia nos custos envolvidos relativos à Engenharia e à mobilização de equipamentos de movimentação de cargas, ou a própria falta de conhecimento das alternativas de soluções construtivas disponíveis por parte dos gestores de projetos, leva usualmente à decisão de se evitar gastos adicionais que decorrem de um estudo de montagem mais elaborado. No entanto, Burke e Miller [2] afirmam que o conceito de modularização em empreendimentos relacionados à geração de energia é utilizado há bastante tempo, com a adoção de *skids* para turbinas a gás, motores, compressores, etc.

No método tradicional de montagem de estruturas metálicas, mesmo em estruturas de grande altura, há uma tendência em se adotar o processo de montagem “peça a peça”, por natureza mais simples, o que implica na necessidade de utilização de um número significativo de

---

\* Contribuição tecnocientífica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

plataformas de andaimes para a instalação de membros estruturais, feitas por trabalhadores submetidos aos riscos que decorrem das operações realizadas em grande altitude. Nestes casos, as operações de içamento são realizadas por guindastes do menor porte possível, dimensionados para atender à montagem da maior peça a ser içada.

Neste método, os trabalhos são realizados na sequência usual “*de baixo para cima*”, para se evitar trabalhos “*sobre-cabeça*” que implicam no risco de queda de material sobre pessoas que estão executando atividades em níveis inferiores. Desta forma, o início das atividades nos trechos mais elevados da estrutura deve aguardar a conclusão dos trabalhos em todos os demais que estão em um nível inferior. A possibilidade de realização de atividades de montagem em paralelo é, portanto, muito dificultada senão praticamente inexistente.

O conceito de Construção Modular presume a “*pré-Engenharia*” e a produção em fábrica de partes de uma estrutura (os *Módulos*), bem como o posterior transporte das mesmas ao canteiro. No presente artigo, explora-se uma variante deste conceito, na qual é mantida a ideia de “*pré-Engenharia*”, sendo a produção em fábrica e transporte dos módulos substituídos pela **entrega no sítio dos componentes separados e posterior montagem dos módulos próxima às posições de instalação**. Este novo conceito é aqui referido como “**Construção Modular em Campo**” (ou simplesmente CMC).

Esta mudança visa minimizar os impactos no empreendimento relacionados à preparação, planejamento e transporte dos módulos, o que pode vir a inviabilizar a solução modular usual pela eventual extemporaneidade das alterações de projeto que se fazem necessárias para viabilizar esta alternativa, caso este se encontre em etapas mais avançadas. O’Connor e Davis [1] afirmam que a modularização com pré-montagem de fábrica demanda suporte extensivo do pessoal de Projeto e Aquisição, enquanto as soluções de pré-montagens de campo, optadas somente pelo construtor, não necessitam do mesmo suporte.

Este artigo objetiva comparar a “Construção Modular em Campo” com o método tradicional de montagem de estruturas metálicas.

A CMC se aplica a um grande número de empreendimentos, mesmo em etapas mais avançadas, por permanecer relativamente próxima ao método tradicional em vários aspectos, a saber:

- Sua aplicação é realizada com base no mesmo projeto básico de Engenharia da estrutura, somente com alterações no detalhamento de conexões e inclusão de pequenos reforços adicionais;
- O transporte ainda se realiza com as peças desmontadas, de modo a ainda possibilitar a utilização de transportadores usuais, conforme o método tradicional;
- Os trabalhos de manufatura, o peso e os quantitativos das peças nas fabricas não sofrem alterações significativas.

---

\* Contribuição tecnocientífica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo comparativo deste artigo é efetuado pela realização de análises de prazos e parâmetros de eficiência construtiva e segurança, pautadas sobre a geometria da estrutura metálica do edifício que abriga os reatores de Polietileno de Alta Densidade do projeto Etileno XXI, construído em Coatzacoalcos, no México.

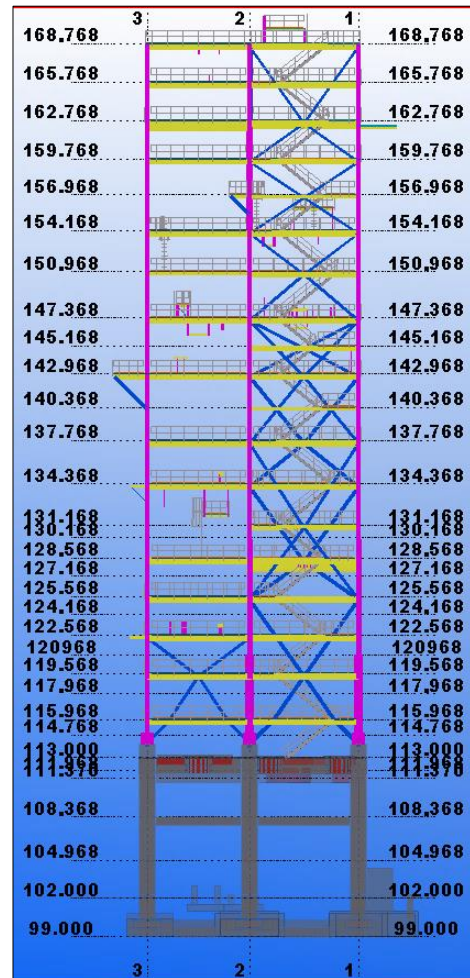
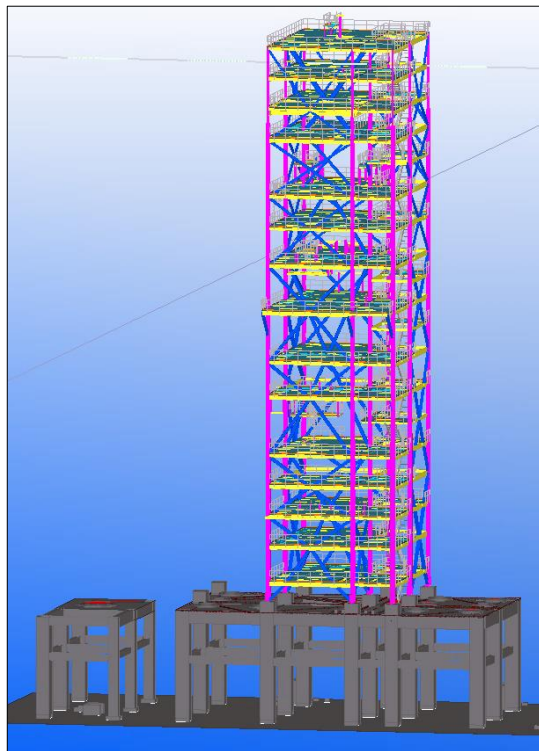
Os prazos obtidos e outros itens comparados não refletem o que foi efetivamente realizado ou planejado no referido projeto. Somente a geometria da planta e do edifício foram utilizados como referencial para as análises aqui apresentadas.

Na construção efetiva da obra, diversos fatores cuja natureza transcende os aspectos técnicos aqui abordados interferiram tanto no cronograma base quanto no realizado. Um debate sobre temas dessa natureza é muito amplo e foge do escopo deste artigo, já que tal discussão em nada contribui para a análise dos pontos que se deseja destacar no presente texto. Os comparativos aqui apresentados foram realizados, portanto, em condições idealizadas de montagem da estrutura.

### 2.1. Características do edifício analisado

O objeto de estudo é um edifício industrial em aço de 19 andares e dimensões aproximadas de 9,0 m × 12,5 m × 55,0 m. O mesmo está montado sobre uma estrutura de concreto com altura de 12,0 m, de modo que o topo do edifício está aproximadamente 67 m acima do nível do terreno, conforme indicado na Figura 1.

O peso total de aço deste edifício é de aproximadamente 770 toneladas. Seu sistema de estabilização horizontal se dá por meio de contraventamentos verticais e horizontais, sendo todas as suas conexões rotuladas e aparafusadas.



Cota do terreno →

Figura 1 – Vista geral do prédio analisado (esquerda), Corte indicando elevações de referência do edifício (direita).  
Fonte: os autores.

## 2.2. Avaliação do prazo estimado de execução

A avaliação de prazo foi realizada por meio do comparativo dos cronogramas teóricos obtidos para as duas condições: o método tradicional de montagem e a aplicação do conceito de CMC.

Os cronogramas foram elaborados com base na quantificação de elementos estruturais a serem montados, conforme apresentados na coluna Quantidade de Peças da Tabela 1. Sobre estas quantidades foi aplicado o consumo unitário de tempo de operação de guindastes para montagem, conforme método descrito por Bellei [8].

Este autor descreve que a duração da montagem de cada peça é indicada pelo tipo de elemento estrutural, o que inclui a lingada com cabo de aço, o içamento, giro, colocação nas fundações, ajuste dos chumbadores, aprumamento preliminar até a liberação do cabo de aço para buscar a próxima peça.

\* Contribuição tecnocientífica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

Ainda de acordo com a metodologia proposta por este autor, considera-se que as atividades de torque ocorrem em paralelo às atividades de içamento. As atividades de soldagem e pintura foram desprezadas nesta avaliação, pois estas não impactam significativamente no resultado de comparação final.

A quantidade de peças a serem montadas foi levantada por andar. Na definição do comprimento das colunas, considerou-se que estas partem da elevação de nascimento e terminam na cota da emenda superior, conforme ilustrado na Figura 2.

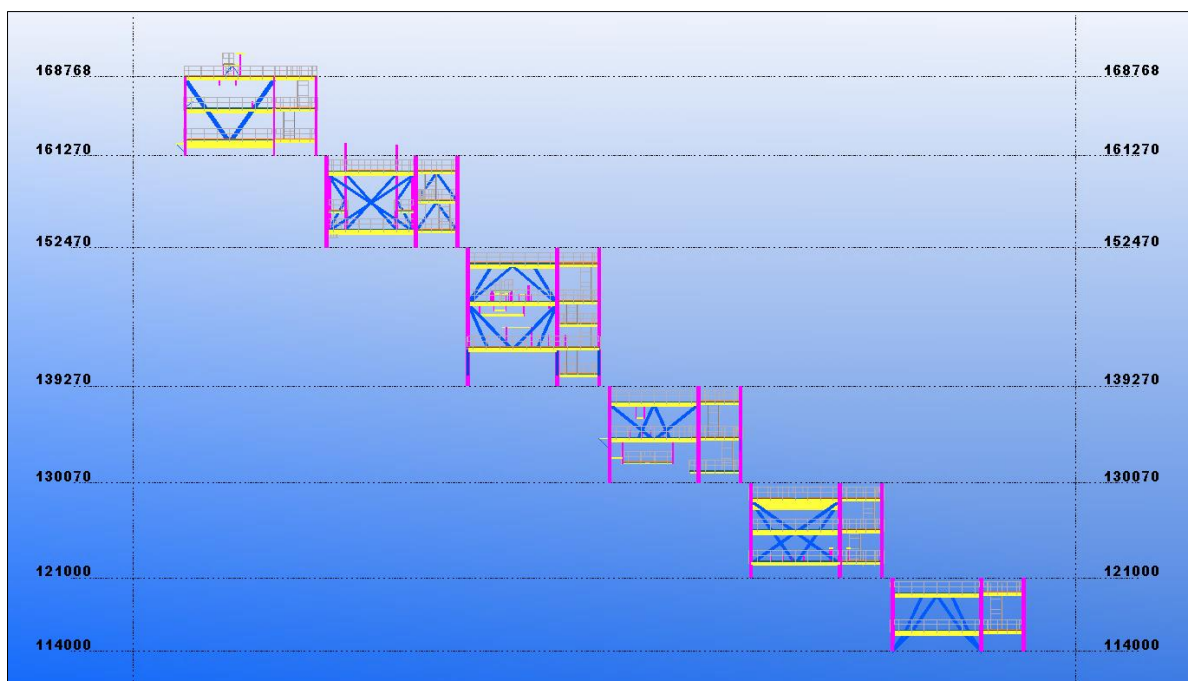
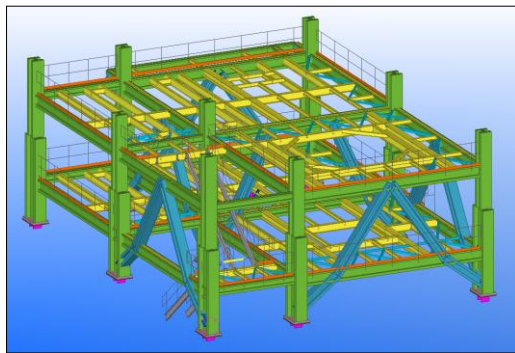
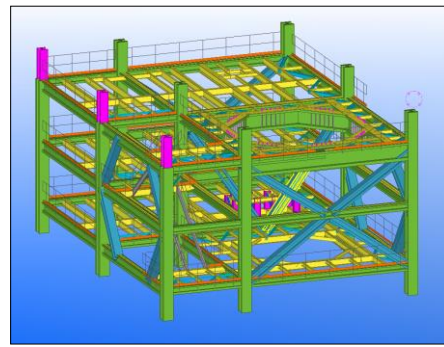


Figura 2 - Indicação das cotas de nascimento e fim dos trechos de colunas metálicas. Fonte: os autores.

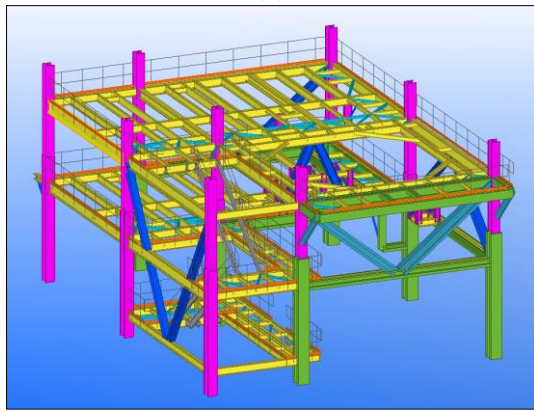
Os módulos considerados são compostos pelas peças posicionadas entre as cotas de emenda de colunas. Estas emendas foram previamente localizadas em projeto, de forma a permitir esta separação, conforme ilustrado na Figura 3.



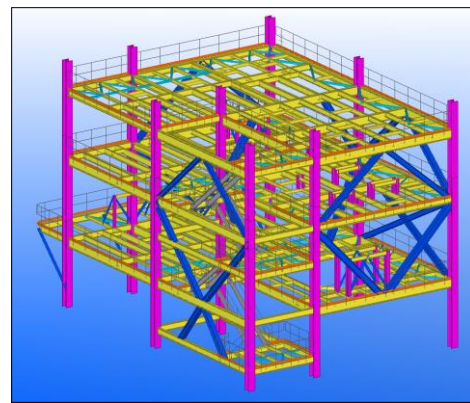
(a)



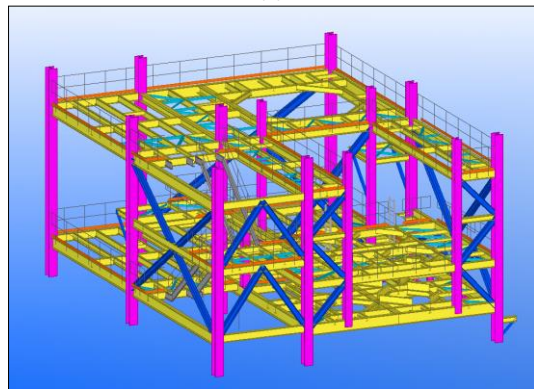
(b)



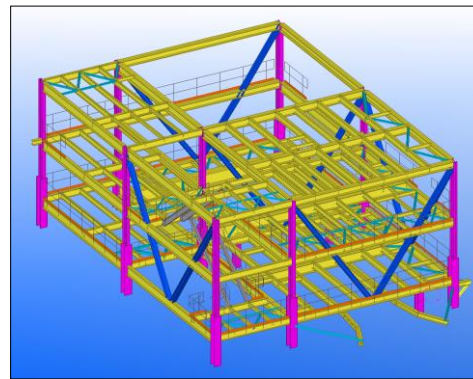
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 3 - Vista geral dos módulos. (a) a (f) Primeiro ao sexto módulos, do mais inferior ao mais superior. Fonte: os autores.

Tabela 1 - Quantitativo de peças e horas consumidas para montagem por elevação.

Cota	Colunas			Vigas e Colunetas			Contraeventamentos Horizontais			Contraeventamentos Verticais			Grades de Piso			Painéis de Guarda-Corpo		
	Qdt de Peças	(H) de Montagem	Total (H) de Montagem	Qdt de Peças	(H) de Montagem	Total (H) de Montagem	Qdt de Peças	(H) de Montagem	Total (H) de Montagem	Qdt de Peças	(H) de Montagem	Total (H) de Montagem	Qdt de Peças	(H) de Montagem	Total (H) de Montagem	Qdt de Peças	(H) de Montagem	Total (H) de Montagem
114000	9	2	18															
115968				71	0.5	35.5	28	0.25	7	12	2	24	122	0.25	31	20	0.25	5
119568				76	0.5	38	19	0.25	4.75	12	2	24	114	0.25	28	17	0.25	4
121000	9	2	18															
122568				104	0.5	52	31	0.25	7.75	12	2	24	117	0.25	29	21	0.25	5
125568				52	0.5	26	26	0.25	6.5	10	2	20	74	0.25	19	15	0.25	4
128568				82	0.5	41	38	0.25	9.5	10	2	20	102	0.25	25	19	0.25	5
130070	9	2	18															
131168				21	0.5	10.5	15	0.25	3.75	2	2	4	22	0.25	6	9	0.25	2
134368				85	0.5	42.5	33	0.25	8.25	10	2	20	83	0.25	21	26	0.25	7
137768				76	0.5	38	31	0.25	7.75	10	2	20	102	0.25	25	19	0.25	5
139270	9	2	18															
140368				10	0.5	5	8	0.25	2	2	2	4	9	0.25	2	7	0.25	2
142968				96	0.5	48	36	0.25	9	13	2	26	136	0.25	34	21	0.25	5
145168				10	0.5	5	8	0.25	2	2	2	4	10	0.25	3	6	0.25	2
147368				146	0.5	73	30	0.25	7.5	10	2	20	121	0.25	30	23	0.25	6
150968				85	0.5	42.5	32	0.25	8	10	2	20	125	0.25	31	22	0.25	6
152470	13	2	26															
154168				153	0.5	76.5	26	0.25	6.5	10	2	20	127	0.25	32	27	0.25	7
156968				17	0.5	8.5	8	0.25	2	10	2	20	11	0.25	3	10	0.25	3
159768				72	0.5	36	42	0.25	10.5	10	2	20	87	0.25	22	24	0.25	6
161270	9	2	18															
162768				79	0.5	39.5	41	0.25	10.25	12	2	24	116	0.25	29	21	0.25	5
165768				83	0.5	41.5	31	0.25	7.75	10	2	20	124	0.25	31	18	0.25	5
168768				88	0.5	44	41	0.25	10.25	10	2	20	132	0.25	33	24	0.25	6

\* Contribuição tecnocientífica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

As durações das atividades previstas para cada elevação foram então agrupadas para se obter uma duração de montagem separada por módulo, conforme disposto na coluna “*Dias Corridos*” da Tabela 2, válida tanto para a montagem segundo a técnica de CMC, como para a montagem tradicional.

Para a obtenção destes dados considerou-se que:

- O trabalho efetivo de movimentação de cargas durante um dia é de 6 horas produtivas. Das 8h de trabalho pleno, descontou-se uma hora para Diálogo Diário de Segurança (DDS) e outra hora por ineficiência, o que inclui: preparativos para início do expediente, remanejamento de peças e outras horas ociosas durante o dia. Bellei [8] considera horas produtivas por dia útil o tempo de trabalho efetivo de movimentação de carga;
- O índice de trabalho parado por condições climáticas adversas de 25% dos dias úteis (improdutividade causada pela ocorrência chuva ou vento);
- A relação entre dias úteis para prazo de duração em dias corridos de 30 para 22 dias;
- A quantidade de horas para a montagem de uma coluna é maior que aquela considerada por Bellei [8], devido ao maior peso das colunas da estrutura descrita neste artigo.



Tabela 2 - Duração em dias para a montagem de cada módulo.

	COTA	ATIVIDADE	DURAÇÃO EM HORAS (Tabela 1)	TOTAL HORAS	DIAS (6HORAS)	DIAS CORRIDOS (CONSIDERANDO CHUVA, DOMINGOS E FERIADOS)
MODULO 01	114000	MONTAGEM COLUNAS	18	220	37	62
	115968	MONTAGEM CONTRAV. VERTICAL	24			
		MONTAGEM VIGAS	36			
		MONTAGEM TRAVAMENTOS	7			
		MONTAGEM GRADES DE PISO	31			
		MONTAGEM GUARDA-CORPO	5			
	119568	MONTAGEM CONTRAV. VERTICAL	24			
		MONTAGEM VIGAS	38			
		MONTAGEM TRAVAMENTOS	5			
		MONTAGEM GRADES DE PISO	28			
MONTAGEM GUARDA-CORPO	4					
MODULO 02	121000	MONTAGEM COLUNAS	18	312	52	89
	122568	MONTAGEM CONTRAV. VERTICAL	24			
		MONTAGEM VIGAS	52			
		MONTAGEM TRAVAMENTOS	8			
		MONTAGEM GRADES DE PISO	29			
		MONTAGEM GUARDA-CORPO	5			
	125568	MONTAGEM CONTRAV. VERTICAL	20			
		MONTAGEM VIGAS	26			
		MONTAGEM TRAVAMENTOS	7			
		MONTAGEM GRADES DE PISO	19			
	MONTAGEM GUARDA-CORPO	4				
	128568	MONTAGEM CONTRAV. VERTICAL	20			
		MONTAGEM VIGAS	41			
		MONTAGEM TRAVAMENTOS	10			
		MONTAGEM GRADES DE PISO	25			
MONTAGEM GUARDA-CORPO		5				
MODULO 03	130070	MONTAGEM COLUNAS	18	234	39	67
	131168	MONTAGEM CONTRAV. VERTICAL	0			
		MONTAGEM VIGAS	11			
		MONTAGEM TRAVAMENTOS	4			
		MONTAGEM GRADES DE PISO	6			
		MONTAGEM GUARDA-CORPO	2			
	134368	MONTAGEM CONTRAV. VERTICAL	20			
		MONTAGEM VIGAS	43			
		MONTAGEM TRAVAMENTOS	8			
		MONTAGEM GRADES DE PISO	21			
	MONTAGEM GUARDA-CORPO	7				
	137768	MONTAGEM CONTRAV. VERTICAL	20			
		MONTAGEM VIGAS	38			
		MONTAGEM TRAVAMENTOS	8			
		MONTAGEM GRADES DE PISO	25			
MONTAGEM GUARDA-CORPO		5				

\* Contribuição tecnocientífica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.



Tabela 2 (cont.) - Duração em dias para a montagem de cada módulo.

MODULO 04	139270	MONTAGEM COLUNAS	18	410	68	116				
	140368	MONTAGEM CONTRAV. VERTICAL	0							
		MONTAGEM VIGAS	5							
		MONTAGEM TRAVAMENTOS	2							
		MONTAGEM GRADES DE PISO	2							
		MONTAGEM GUARDA-CORPO	2							
	142968	MONTAGEM CONTRAV. VERTICAL	26							
		MONTAGEM VIGAS	48							
		MONTAGEM TRAVAMENTOS	9							
		MONTAGEM GRADES DE PISO	34							
		MONTAGEM GUARDA-CORPO	5							
	145168	MONTAGEM CONTRAV. VERTICAL	4							
		MONTAGEM VIGAS	5							
		MONTAGEM TRAVAMENTOS	2							
		MONTAGEM GRADES DE PISO	3							
	147368	MONTAGEM GUARDA-CORPO	2							
		MONTAGEM CONTRAV. VERTICAL	20							
		MONTAGEM VIGAS	73							
		MONTAGEM TRAVAMENTOS	8							
	150968	MONTAGEM GRADES DE PISO	30							
MONTAGEM GUARDA-CORPO		6								
MONTAGEM CONTRAV. VERTICAL		20								
MONTAGEM VIGAS		43								
MODULO 05	152470	MONTAGEM TRAVAMENTOS	8	277	46	79				
		MONTAGEM GRADES DE PISO	31							
		MONTAGEM GUARDA-CORPO	6							
		MONTAGEM CONTRAV. VERTICAL	20							
		MONTAGEM VIGAS	26							
	154168	MONTAGEM COLUNAS	26							
		MONTAGEM CONTRAV. VERTICAL	0							
		MONTAGEM VIGAS	77							
		MONTAGEM TRAVAMENTOS	7							
		MONTAGEM GRADES DE PISO	32							
	156968	MONTAGEM GUARDA-CORPO	7							
		MONTAGEM CONTRAV. VERTICAL	20							
		MONTAGEM VIGAS	9							
		MONTAGEM TRAVAMENTOS	2							
	159768	MONTAGEM GRADES DE PISO	3							
		MONTAGEM GUARDA-CORPO	3							
		MONTAGEM CONTRAV. VERTICAL	20							
		MONTAGEM VIGAS	36							
	MODULO 06	161270	MONTAGEM TRAVAMENTOS				11	320	53	91
			MONTAGEM GRADES DE PISO				22			
MONTAGEM GUARDA-CORPO			6							
MONTAGEM CONTRAV. VERTICAL			20							
MONTAGEM VIGAS			40							
162768		MONTAGEM COLUNAS	18							
		MONTAGEM CONTRAV. VERTICAL	0							
		MONTAGEM VIGAS	40							
		MONTAGEM TRAVAMENTOS	10							
		MONTAGEM GRADES DE PISO	29							
165768		MONTAGEM GUARDA-CORPO	5							
		MONTAGEM CONTRAV. VERTICAL	20							
		MONTAGEM VIGAS	42							
		MONTAGEM TRAVAMENTOS	8							
168768		MONTAGEM GRADES DE PISO	31							
		MONTAGEM GUARDA-CORPO	5							
		MONTAGEM CONTRAV. VERTICAL	20							
		MONTAGEM VIGAS	44							
		MONTAGEM TRAVAMENTOS	10							
168768		MONTAGEM GRADES DE PISO	33							
	MONTAGEM GUARDA-CORPO	6								

\* Contribuição tecnocientífica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

### 2.3. Guindastes Considerados

Para a montagem de acordo com o método tradicional, a duração das atividades foi calculada considerando-se que a montagem da estrutura seria efetuada com a utilização de somente uma grua torre “telescópica” (*i.e.* com altura variável). O uso desta alternativa e arranjo como único equipamento de movimentação de carga se torna atraente em virtude das dimensões em planta relativamente reduzidas da edificação. Caso contrário, se incorreria em situações de risco de colisão de lanças durante manobras, se duas ou mais gruas-torre fossem utilizadas.

Para a montagem da solução modularizada em campo, foi considerada a utilização de um guindaste hidráulico telescópico com capacidade de 70 toneladas dedicado para a montagem de cada módulo, num total de três equipamentos. Nesta alternativa, o equipamento adotado para o içamento dos módulos até a sua posição final é um guindaste de esteiras e lança treliçada com capacidade máxima de 600 toneladas, mobilizado de forma a estar disponível para o içamento do primeiro módulo.

### 2.4. Área de pré-montagem

O’Connor e Davis [1] afirmam que um dos conceitos de construtibilidade a ser aplicado durante as etapas de Projeto e Aquisição é a adoção de *layouts* de campo que promovam uma construção eficiente. Este tipo de *layout*, que provê amplas áreas livres nas proximidades das atividades de construção, é prática comum em obras industriais bem planejadas, onde os projetistas da planta já levam em conta as dificuldades inerentes de montagem na disposição dos equipamentos mecânicos e das suas estruturas de apoio.

Este é também o caso do projeto ora analisado. De fato, em frente ao prédio a ser construído, havia um pátio relativamente amplo previsto para a movimentação de máquinas, estocagem de peças e suprimentos para a obra e realização de operações de pré-montagem. Esta disposição torna possível a construção simultânea de três módulos em paralelo, conforme arranjo proposto na Figura 4.

---

\* Contribuição tecnocientífica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

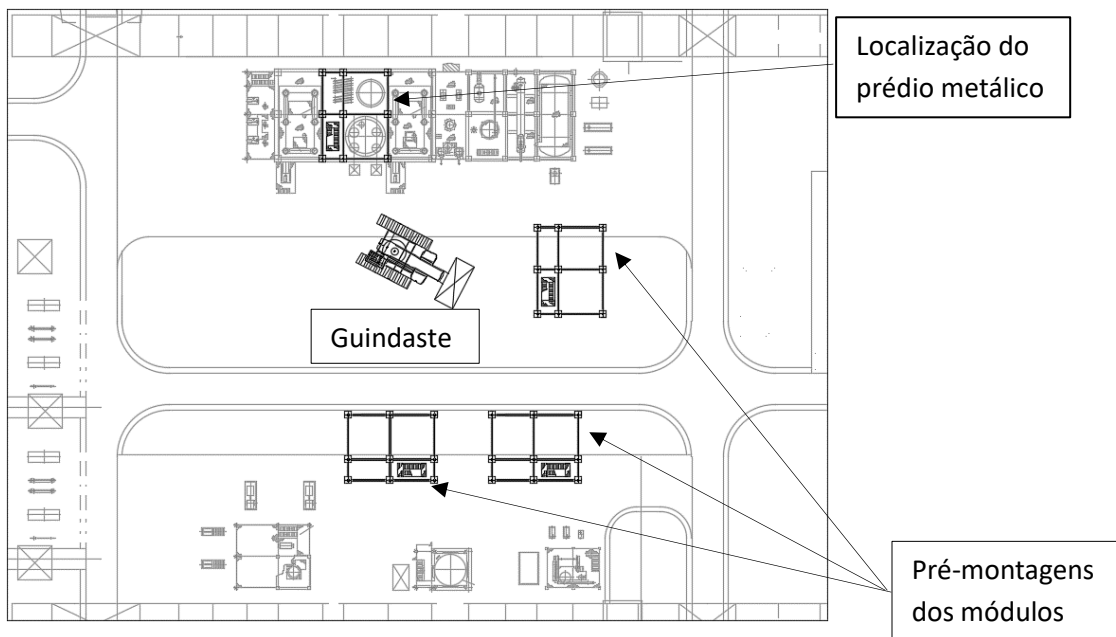


Figura 4 - Layout da planta durante a montagem dos módulos. Fonte: os autores.

### 3. PRINCIPAIS RESULTADOS

#### 3.1. Comparativo de cronogramas

As figuras abaixo (Figura 5 / Figura 6) apresentam os cronogramas obtidos com base nos sequenciamentos de montagem adotados para as duas soluções comparadas.

Em nenhuma destas sequências existe trabalho sobre a cabeça; ou seja, a ocorrência de atividades de montagem em uma elevação impede qualquer atividade concomitante executada em elevações inferiores. Além disso, a sequência de trabalhos das plataformas dentro de um módulo é tal que estas não ocorrem em paralelo, sendo planejada de tal forma que os elementos que integram o módulo são montados das elevações mais baixas para as mais altas.

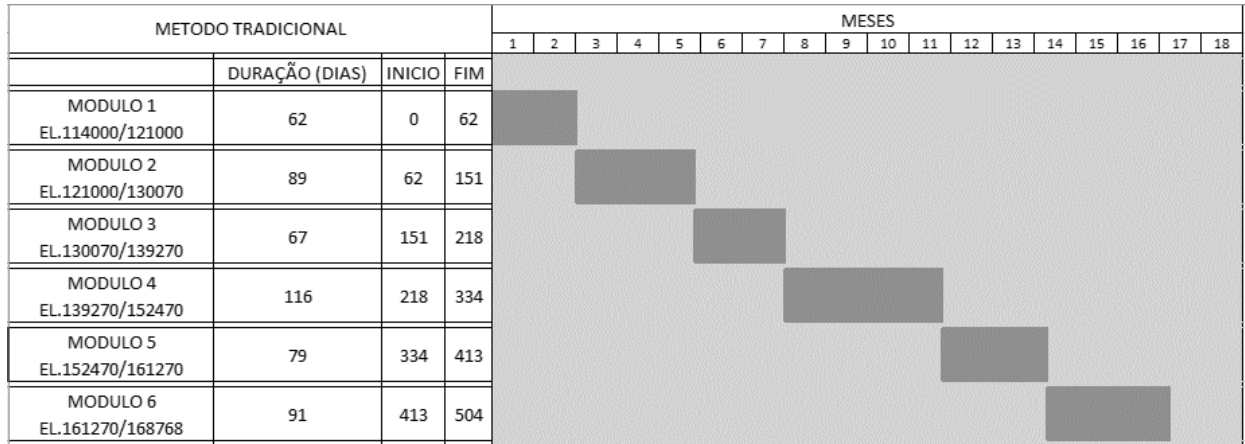


Figura 5 - Cronograma para o Método Tradicional – Elaborado pelos autores

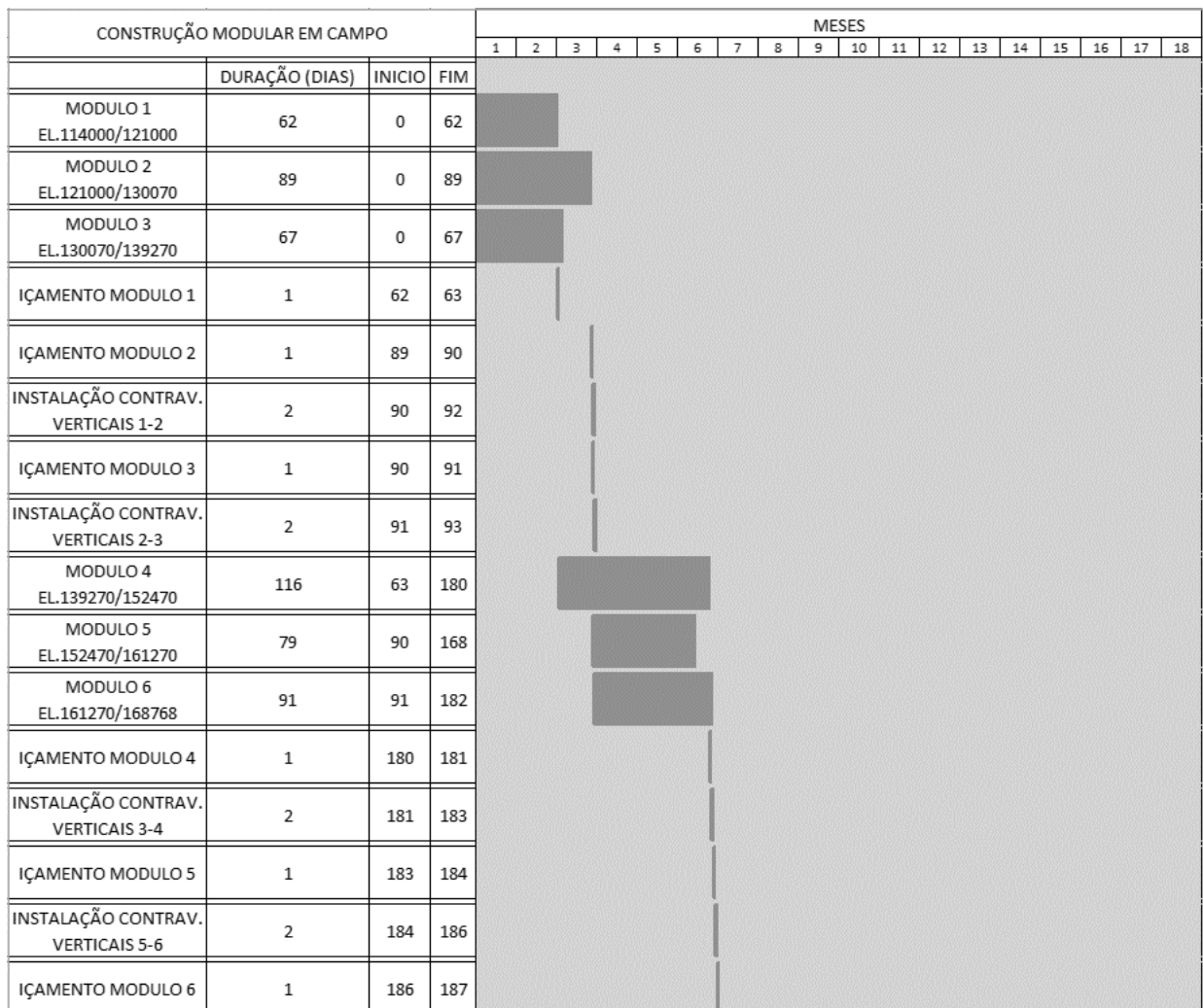


Figura 6 - Cronograma para a CMC – Elaborado pelos autores

\* Contribuição tecnocientífica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

O comparativo entre os cronogramas apresentados permite concluir que a solução com base na técnica de CMC apresenta um **ganho de cronograma** de 317 dias, diminuindo o prazo teórico de montagem de 504 dias para 187 dias. Isto representa uma redução do prazo de 62,89% em relação ao método tradicional.

Este ganho no cronograma advém primordialmente do paralelismo de construção. De fato, Russel [9] faz um comparativo desta concomitância com técnicas clássicas de “*linhas-de-montagem*” adotadas em processos fabris.

A redução do tempo de montagem da estrutura tem reflexos favoráveis no caminho crítico dos projetos industriais, pois é a atividade predecessora da instalação dos equipamentos que esta suporta e de todas as outras atividades subsequentes, relacionadas às demais disciplinas (tubulação, elétrica, isolamento térmico, etc.).

### 3.2. Outros Benefícios

Além da redução de prazo propriamente dita, uma série de outros benefícios podem resultar da opção pela CMC.

Um primeiro ganho direto está na **redução da quantidade de andaimes** temporários necessários, pois os módulos permitem que o acesso para montagem seja provido por plataformas elevatórias mecanizadas (em geral conhecidas no campo como *Man-lift* ou “*girafas*”). Na solução tradicional, andaimes temporários são necessários para acessar os locais de montagem em alturas onde as *girafas* disponíveis no mercado não permitem o acesso. Na CMC, a quantidade de andaimes necessária é quase nula, tornando-se negligenciável neste comparativo.

Outra vantagem principal está no **ganho em segurança**. Segundo Carter [3], a tarefa mais importante de um empreendimento é assegurar que todos os membros do time trabalhem com segurança. Este ganho é de difícil quantificação e requer o acompanhamento de longo prazo de índices obtidos em obras onde uma estratégia específica adotada é investigada. Porém, pode-se inferir que trabalhos realizados em alturas próximas ao terreno trazem menos risco tanto de queda de pessoas como de materiais.

O trabalho que se utiliza de plataformas elevatórias mecanizadas pode também ser considerado mais seguro que aquele realizado sobre andaimes, por conta deste último apresentar maior possibilidade de erros construtivos e falhas de montagem. Russel [9] aponta, como um resultado direto da aplicação de modularização, a redução do nível de acidentes nos casos analisados para níveis muito abaixo dos registros usuais da indústria.

Relacionada à altura dos trabalhos, também está o **ganho em eficiência construtiva**, por conta da facilidade do acesso dos trabalhadores e materiais aos locais de montagem. Além disso, trabalhos de movimentação de carga em menores alturas são menos impactados por ventos fortes e o tempo em operação dos guindastes utilizados é maximizado pela menor ocorrência de interrupções por conta de condições climáticas.

---

\* Contribuição tecnocientífica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

Na análise de cronograma apontada no item 3.1, estes ganhos de eficiência e o tempo de montagem dos próprios andaimes para permitir os acessos não estão inclusos. Se estes forem considerados, o **ganho de cronograma** da CMC em relação ao método tradicional resultaria ainda mais significativo.

Outro aspecto beneficiado pela redução de prazo é o ganho financeiro, em virtude do menor **tempo de mobilização de mão de obra indireta** para exercer as funções administrativas e gerenciais, cujo custo é muito significativo para o empreendimento.

Finalmente, no caso de uma planta industrial, a possível **entrega antecipada do empreendimento** permite partir a planta e iniciar a produção em uma data anterior àquela inicialmente prevista. Isto traz um grande benefício financeiro aos investidores, que muitas vezes se reflete em bônus aos contratos de EPC.

### 3.3. Outros aspectos relevantes

#### 3.3.1. Engenharia adicional

A CMC demanda uma engenharia específica, realizada por uma equipe especializada neste domínio, distinta da equipe de projeto da estrutura e dedicada especialmente às verificações estruturais relativas às atividades de montagem.

Esta engenharia contemplará, entre outros pontos, os itens relacionados abaixo:

- Projeto de blocos de fundação temporários para a construção dos módulos sobre o terreno;
- Engenharia estrutural para verificação da estabilidade dos módulos durante sua montagem sobre as bases temporárias;
- Engenharia de movimentação de cargas pesadas envolvendo:
  - Verificação estrutural dos módulos para a operação de içamento;
  - Dimensionamento do arranjo de cabos e manilhas;
  - Reforço de terreno para suporte do guindaste de grande porte responsável pelo içamento dos módulos;
  - Projeto de dispositivos de içamento, como balancins e a grelha de içamento.

As grelhas de içamento podem ser projetadas de forma a serem reutilizáveis. Estes projetos, ao prever vários olhais, possibilitam adequar o arranjo de lingada às diversas posições de centro de gravidade dos módulos, conforme exemplificado nas figuras abaixo (Figura 7 / Figura 8). Com isso, não são necessários ajustes nos comprimentos das eslingas para alinhar o centro de gravidade da peça à prumada de cabos do guindaste, como usualmente ocorre na ausência deste recurso.



Figura 7 - Exemplo de grelha de içamento com diversos olhais sendo utilizada sobre um módulo a ser içado – Fonte: Arquivo da obra.

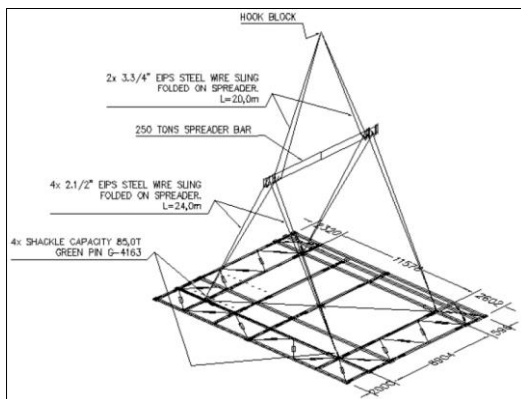


Figura 8 - Exemplo de projeto de arranjo de lingadas para içamento de um módulo utilizando grelha de içamento (esquerda). Foto da utilização deste arranjo (direita). Fonte: Arquivo da obra.

Outra vantagem associada ao uso das grelhas vem do fato que, quando são fixadas, estas “gabaritam” o módulo a ser içado, fazendo com que a posição horizontal relativa das emendas de colunas corresponda exatamente àquela do módulo anterior previamente instalado. Isto facilita o acoplamento entre módulos e permite que as estruturas sejam içadas com as conexões já torquedadas à sua posição final, reduzindo trabalhos em altura e minimizando a necessidade de ajustes após seu posicionamento.

### 3.3.2. Planejamento

O planejamento da CMC deve ser muito criterioso e a elaboração do cronograma deve ser guiada pela metodologia de construção selecionada. Os profissionais de Aquisição devem considerar o sequenciamento de montagem previsto, para assim evitar a antecipação do recebimento dos materiais após adquiridos ou a estocagem daqueles recebidos muito antes da sua etapa de utilização; fatores estes que estão diretamente atrelados a custos adicionais para o empreendimento.

Os pacotes de fabricação devem também estar muito bem delineados junto aos fornecedores, de forma a garantir que as peças que pertencem a um mesmo módulo estejam em um mesmo lote, de modo que o sequenciamento de montagem desejado não seja inviabilizado. Isto demanda um trabalho de diligenciamento efetivo.

A mobilização de equipamentos e mão de obra também deve estar orquestrada com o sequenciamento e volume de recebimento de materiais, sob o risco de se receber materiais na obra sem os recursos necessários para a realização da correspondente montagem, incorrendo-se assim em grandes custos que resultam da improdutividade.

### 3.3.3. Intervenções no projeto

A CMC é passível de ser implementada com pequenas alterações no projeto da estrutura metálica durante a fase de projeto de detalhamento. Nesta fase, a estrutura já possui um esquema estrutural de projeto básico consolidado e as tipologias das conexões previstas para os membros estão contempladas nos desenhos de fabricação.

As conexões parafusadas devem ser projetadas de forma a permitir que os módulos sejam montados isoladamente e posteriormente vinculados. A Figura 9 ilustra um caso onde conexões de vigas opostas que compartilhem parafusos podem inviabilizar a modularização. De fato, supondo-se que uma das vigas já se encontre instalada junto ao módulo, a viga oposta não poderia ser instalada posteriormente, pois os parafusos já estariam posicionados.

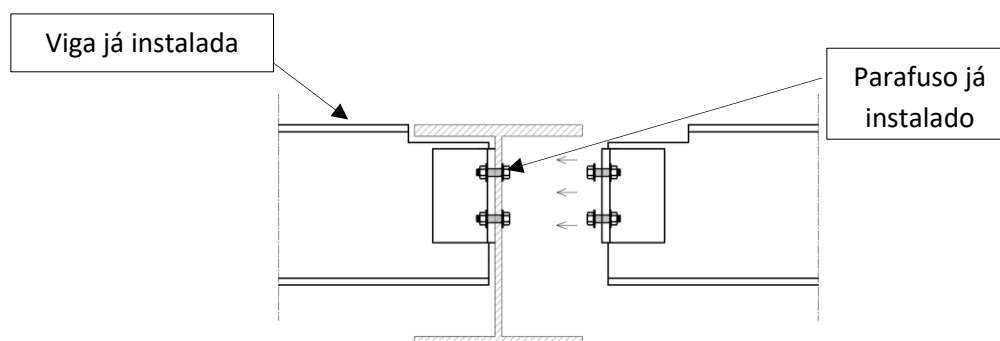


Figura 9 - Conexão com parafusos compartilhados não permitem a instalação posterior de outras vigas e podem comprometer a estratégia de montagem. Fonte: os autores.

Para evitar este problema, poderiam ser adotadas conexões de vigas que eliminam o compartilhamento de parafusos e permitem o acesso da viga à ser montada a posteriori diretamente por cima, sem manobras significativas para o encaixe. Um exemplo desta tipologia é ilustrado na Figura 10.

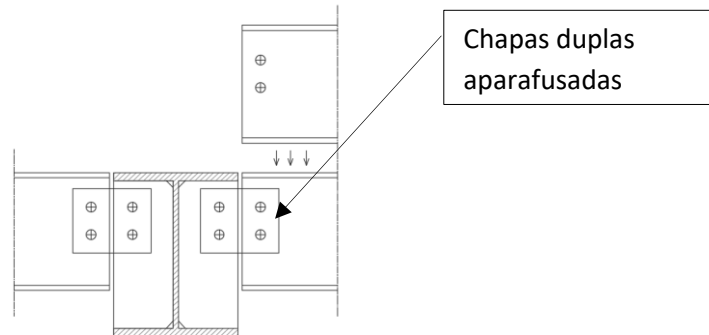


Figura 10 - Conexões com chapas duplas são favoráveis pois permitem a montagem isolada de cada viga e o acesso por cima da viga a ser instalada. Fonte: os autores.

Conexões de vigas que compartilham elementos com emendas de colunas também podem inviabilizar a estratégia aqui proposta. A Figura 11 exibe um exemplo em que a montagem da viga demanda que as talas das emendas de coluna já estejam previamente instaladas. O trecho inferior da tala da coluna não permite o assentamento do módulo sobre as bases provisórias.

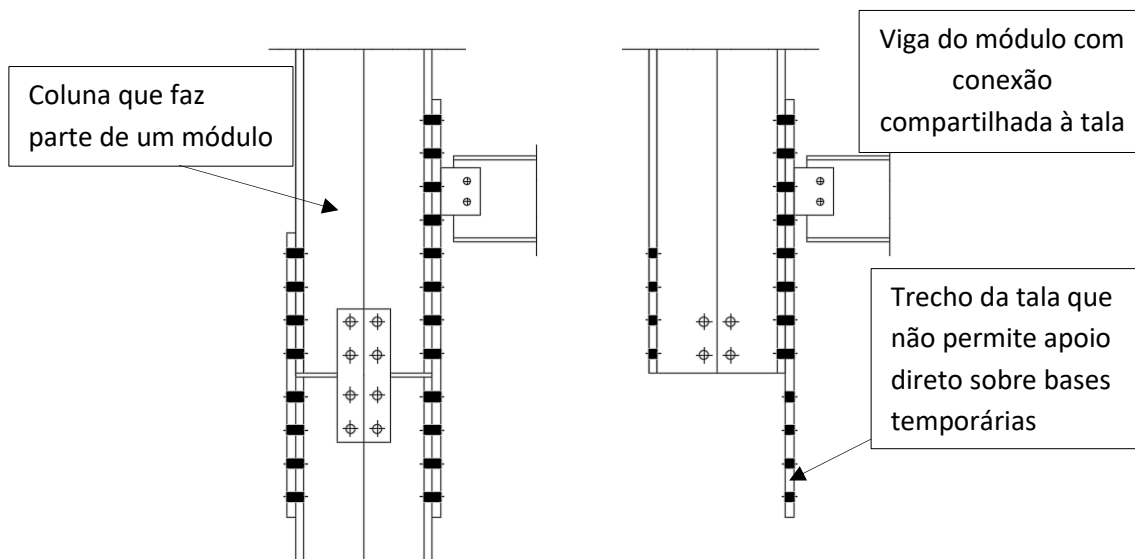


Figura 11 - Emenda de coluna com talas que não permitem a montagem separada em módulos. Configuração do projeto final (esquerda). Configuração do módulo isolado (direita). Fonte: os autores.

As emendas das colunas devem ser cuidadosamente analisadas quanto a sua posição e tipologia. Conforme exposto anteriormente, a posição das emendas é o que conforma e individualiza os módulos, definindo seu peso e dimensões. Salienta-se que estas somente podem ser definidas e posicionadas levando-se em conta a capacidade do guindaste a ser utilizado no içamento final.

A utilização de emendas localizadas à altura de 1,10 m acima da plataforma superior de um módulo, tal como ilustrado na Figura 12, permite o acesso para a conexão com o módulo seguinte de forma otimizada. Assim procedendo, os trabalhadores não necessitarão de andaimes para permitir o acesso temporário durante o acoplamento do módulo superior, podendo para tanto utilizar como acesso as escadas definitivas da própria estrutura.

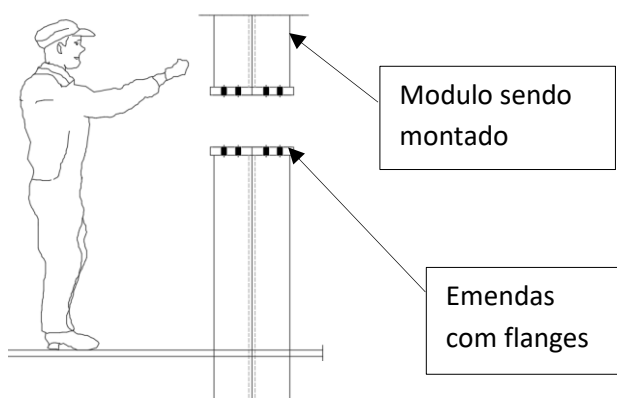


Figura 12 - Posição da emenda permite acesso fácil de pessoas para sua montagem. Fonte: os autores.

A tipologia da emenda de coluna alterada para uma ligação flangeada, como apresentado na Figura 13, permite aparafusar os módulos à grelha de içamento reutilizável, além da possibilidade de se utilizar a chapa do flange como chapa de base para o apoio do módulo nas fundações temporárias.

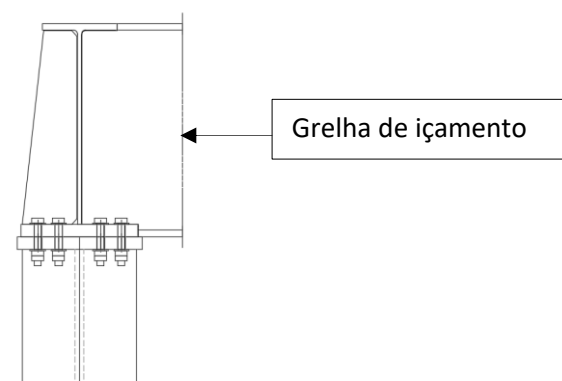


Figura 13 - A tipologia de flange para emendas de colunas permite a conexão com grelhas de içamento. Fonte: os autores.



Um engenheiro calculista de estrutura especializado deverá verificar a necessidade de reforços para estabilizar os módulos durante as fases de construção e içamento. Embora de fundamental importância para a segurança destas fases provisórias, a quantidade de reforços necessários não é em geral muito significativa, quando o peso do material adicionado é comparado ao peso da estrutura, tendo-se em conta que tal reforço consiste tipicamente na inclusão de algumas diagonais delgadas para travamento dos módulos no terreno, ou de reforços pontuais para introdução dos carregamentos de içamento nos pontos de pega.

### 3.3.4. Guindastes

O custo dos guindastes é um aspecto de alta relevância na opção pela adoção ou não da estratégia de CMC.

Os histogramas apresentados abaixo (Figura 14 / Figura 15) foram obtidos a partir dos cronogramas comparativos entre os métodos apresentados no item 3.1 e da quantidade de guindastes descrita no item 2.3. Ao se atribuir os valores de mercado de aluguel a estes histogramas, contemplando-se também os valores de mobilização e transporte dos equipamentos, é possível se obter a diferença financeira entre as alternativas apresentadas.

O comparativo financeiro não é escopo deste artigo. Ressalta-se, no entanto, que muito embora o histograma da alternativa de CMC resulte com uma menor duração, é esperado que o custo geral de guindastes previsto seja significativamente maior neste caso, se comparado ao método convencional, em virtude da necessidade de utilização de um guindaste de grande porte para o içamento final dos módulos. Este não seria necessário se fosse adotada a montagem tradicional. Entretanto, esta diferença deve ser necessariamente superada pelos benefícios financeiros da metodologia de CMC, oriundos do menor prazo de construção e da entrega antecipada do empreendimento.

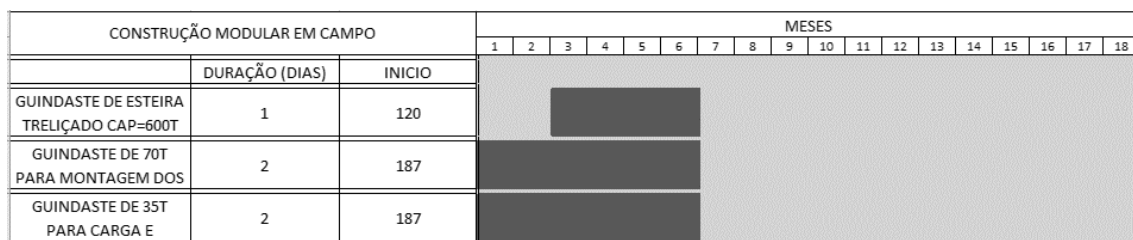


Figura 14 - Histograma de guindastes para a CMC – Elaborado pelos autores

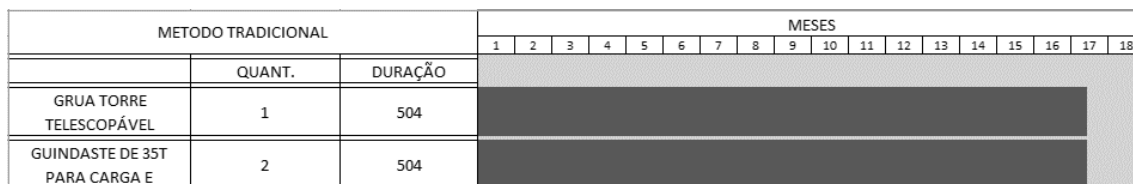


Figura 15 - Histograma de guindastes para o método tradicional – Elaborado pelos autores

### 3.3.5. Mão-de-obra direta

Na solução tradicional, seria utilizada somente uma equipe típica de montagem. A equipe considerada segue as orientações de Bellei [8] e é composta da seguinte forma:

- Equipe de içamento:
    - 01 mestre
    - 02 montadores
    - 01 soldador
    - 02 ajudantes
- Subtotal..... 06 Pessoas
- Equipe de torque: 01 ajudante
  - Equipe de solda: 01 soldador
- Total..... 08 Pessoas**

A quantidade de Hh (*Homem-hora*) necessária para a montagem da solução tradicional é obtida pela expressão abaixo:

$$\text{Hh (Método Tradicional)} = 8 \text{ pessoas} * 504 \text{ dias} * 8 \text{ horas} = \mathbf{32.256 \text{ Hh}} \quad (1)$$

As equipes para a metodologia de CMC devem ser três vezes mais numerosas, em razão da construção simultânea de três módulos, conforme exposto no item 2.4. Assim, o Hh necessário para esta solução é ampliado em aproximadamente 11%. De fato:

$$\text{Hh (CMC)} = 8 \text{ pessoas} * 3 * 187 \text{ dias} * 8 \text{ horas} = \mathbf{35.904 \text{ Hh}} \quad (2)$$

Este aumento pode ser considerado negligenciável, porque os ganhos devidos aos fatores de acréscimo de produtividade não estão quantificados, tais como a maior eficiência pelo trabalho em menor altura, o menor tempo de montagem de andaimes e a maior facilidade de acesso aos pontos de montagem. Estes fatores tendem a diminuir esta diferença. Isto permite considerar, a grosso-modo, os custos de equipes de mão-de-obra direta aproximadamente iguais em ambas as soluções.

### 3.3.6. Etapa ideal para aplicação da CMC

O'Connor e Davis [1] ressaltam que o planejamento de utilização de grandes guindastes, e conseqüentemente da modularização, deve ocorrer o mais cedo possível. No entanto, este também afirma que os construtores ainda podem obter os benefícios de construtibilidade em etapas mais avançadas do projeto, mesmo durante as operações em campo.

Reconhece-se como prática comum em grandes empreendimentos que diversas atividades são iniciadas sem a determinação da estratégia construtiva a ser efetivamente adotada. A urgência de se iniciar a fabricação dos componentes estruturais para se atender aos prazos acordados normalmente exerce uma grande pressão para que os projetos básicos de Engenharia estrutural sejam executados apressadamente, sem que haja a oportunidade para a realização

---

\* Contribuição tecnocientífica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

dos debates necessários acerca da construtibilidade da solução adotada durante as etapas de definição de arranjo e dimensionamento dos elementos estruturais.

Jergeas e Van der Put [5] relatam que muitos projetos não recebem *inputs* de construtibilidade. Em geral, o pessoal responsável pela construção participa do projeto somente quando o arranjo da estrutura já está definido, embora esta não seja a fase ideal para tanto. Porém, caso o projeto de detalhamento da estrutura ainda esteja em andamento e a fabricação ainda não tenha sido iniciada, pode-se ainda implementar, com o devido aval do projetista, as intervenções necessárias no projeto para permitir a modularização, conforme abordado no item 3.3.3.

Os outros trabalhos de engenharia relativos à CMC, como preparação das bases de pré-montagem, verificação estrutural dos módulos, reforços, etc. podem ser executados concomitantemente ao processo de fabricação e transporte da estrutura.

#### 4. CONCLUSÃO

O presente artigo aborda a “*Construção Modular em Campo*” como uma alternativa de montagem de estruturas metálicas de grande porte. Com base na comparação deste método alternativo com o processo de montagem convencional (“*peça por peça*”) para um caso real, constatou-se que a estratégia de Construção Modular em Campo pode trazer grandes benefícios, em virtude dos reflexos favoráveis nos custos e nos prazos para a construção da edificação. Sua aplicação pode ser viável mesmo em estruturas cujo projeto básico de engenharia não tenha sido elaborado tendo-se em conta esta premissa, através de pequenas intervenções e adaptações no detalhamento das conexões e inclusão de reforços pontuais para permitir o içamento dos módulos.

A avaliação de viabilidade deverá contrastar os aspectos debatidos anteriormente, resumidos abaixo:

- Benefícios:
  - Segurança de trabalhos em menor altura;
  - Antecipação da utilização da estrutura e da produção industrial (a razão do projeto);
  - Menor consumo de mão-de-obra indireta;
  - Paralelismo de atividades durante a montagem;
  - Menor consumo de andaimes;
  - Maior eficiência nos trabalhos de montagem;
  - Menor improdutividade por conta da ocorrência de condições climáticas adversas.
- Contrapontos:
  - Necessidade de verificações estruturais adicionais;
  - Construção de bases e fundações temporárias;
  - Necessário reforço de terreno para possibilitar a ocorrência de operações de içamento com guindaste de grande porte;
  - Maior quantidade e porte de guindastes;
  - Maior atuação do pessoal de Aquisição e Diligenciamento;

---

\* Contribuição tecnocientífica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

- Pequeno consumo adicional de aço;
- Maior necessidade de área de pré-montagem e estocagem.

Pelo fato do ganho em prazo ser evidente, a CMC se apresenta como uma relevante estratégia a ser debatida em estudos de construtibilidade.

### Agradecimentos

Os autores agradecem aos Engs. Jacques Raigorodsky e Antonio Hermont por compartilharem suas experiências em construtibilidade, à Prof. Dr. Claudia Macedo pela revisão do texto e à empresa ODEBRECHT, pelo apoio técnico e por sempre fomentar as melhores e mais seguras práticas de construção.

### REFERÊNCIAS

- 1 O'Connor J. T. e Davis V. S. Constructability Improvement during field Operations. Journal of Construction Engineering and Management. 1988; Vol.114(4): p548-564.
- 2 Burke G. P. e Miller R. C. Modularization speeds construction. Power Engineering. 1998; Vol.102(1): p20. Disponível em: <http://www.power-eng.com/articles/print/volume-102/issue-1/features/modularization-speeds-construction.html>. Acesso em maio/2016.
- 3 Carter R. Consider high-impact constructability issues for refineries. Hydrocarbon Processing. 2010; Vol.89(9): p39-42.
- 4 Zolfagharian S., et. al. A Conceptual Method of Constructability Improvement. IACSIT International Journal of Engineering and Technology. 2012; Vol.4(4): p456-459.
- 5 Jergeas G. e Van der Put J. Benefits of Constructability on Construction Projects. Journal of Construction Engineering Management. 2001; Vol.127(4): p281-290.
- 6 Cambridge Dictionaries Online. Reino Unido. Disponível em: <http://dictionary.cambridge.org/us/dictionary/english/module>. Acesso em maio/2016.
- 7 SteelConstruction.info. Modular construction. SteelConstruction.info. Disponível em: [http://www.steelconstruction.info/Modular\\_construction](http://www.steelconstruction.info/Modular_construction). Acesso em maio/2016.
- 8 Bellei I., et. al. Edifícios de Múltiplos Andares em Aço. São Paulo: PINI; 2004.
- 9 Russel J., et al. Comparative Analysis of Three Constructability Approaches. Journal of Construction Engineering Management. 1994; Vol.120(1): p180-195.