



OTIMIZAÇÃO DO CORTE DE TUBOS ESTRUTURAIS EM UMA EMPRESA DE MÁQUINAS AGRÍCOLAS

Cassiano Tavares (UFSCar) cassiano.tavares@estudante.ufscar.br
Rafael De Biagi (UNICEP) Rafael_debiagi@hotmail.com

Resumo

Neste trabalho foram propostos dois modelos matemáticos com adaptações do trabalho de Abuabara e Morabito (2009) em uma empresa que produz máquinas agrícolas em São Carlos/SP. Os modelos foram aplicados em um problema de corte unidimensional em uma família de barras tubulares estruturais. Nas duas modelagens matemáticas foram utilizados: a Programação Inteira Mista, o software de propósito geral GAMS e o solver CPLEX. Quatro métodos de solução foram avaliados com os dados de uma semana de planejamento de uma família de barras tubulares, a saber, Manual, Modelo 1, Modelo 1 com aumento de demanda, representado por Modelo 1(*) e Modelo 2. Nos testes computacionais, foi possível observar que à medida que mais itens adicionais à demanda foram inseridos ao plano de corte para a minimização das sobras, houve uma redução significativa nos custos de sobra de material. Neste sentido, o Modelo 2 é o mais indicado para implementação na Empresa A., uma vez que, a sua estratégia permitiu uma redução de 91,10% no custo de sobra de material em relação ao método Manual que é utilizado atualmente na empresa estudada. Utilizando o planejamento via Modelo 2, foi alcançada uma redução de R\$ 1.458,00 com o custo de sobras de material de uma dada matéria prima, em um planejamento semanal.

Palavras-Chaves: Corte unidimensional. Tubos Estruturais. Máquinas Agrícolas. Programação Inteira Mista.

1. Introdução

O Problema de Corte Estoque (PCE) está presente em diversos segmentos industriais como: papel, vidro, plástico, metalúrgico, moveleiro etc. O PCE basicamente consiste em cortar objetos (peças grandes de tamanho padronizado que podem ser: bobinas, chapas, tubos estruturais etc.) em itens (peças menores que geram os componentes necessários para o

processo de manufatura) de tamanhos variados para atender solicitações de demanda. Durante este processo existem perdas de material indesejáveis, com isso surge uma necessidade de otimizar estas perdas, de modo a reduzir o custo relacionado a elas. Em sua definição, PCE consiste em cortar objetos para a produção de itens nas quantidades solicitadas, de modo que, a sobra de material nos objetos seja mínima. O PCE pode ser várias dimensões, podendo ser: unidimensional, bidimensional, tridimensional etc. (ARENALES et al., 2015). O presente trabalho aborda o problema unidimensional.

Indústrias do segmento metalúrgico em muitas situações necessitam da aplicação do PCE unidimensional, consumindo: (i) barras lineares maciças para a produção de: treliças, hastes, pinos, buchas etc. (ii) tubos estruturais com mais variados perfis: quadrado, retangular, redondos etc., para a produção de componentes estruturais como: estruturas de toldos, estruturas das asas de aviões, chassi de máquinas, colunas de carros etc. É justamente neste segundo ponto em que o presente trabalho está localizado. O objetivo do trabalho é redução de perdas no processo produtivo de corte unidimensional de tubos estruturais em uma indústria de máquinas agrícolas da cidade de São Carlos/SP.

O foco do trabalho é uma linha de produção de uma máquina agrícola conhecida como escarificador de solo. Os tubos estruturais são componentes do chassi desta máquina. Existem oito variações de tamanhos de escarificador no portfólio de produtos da Empresa A. Estas variações de tamanho de máquinas, demandam de componentes tubulares estruturais de tamanhos variados. A Figura 1 apresenta o conjunto de variações de tamanhos de chassis, e conseqüentemente as variações de comprimentos dos tubos estruturais que compõem o chassi das máquinas, onde cada cor de chassis, representa um tamanho de máquina.

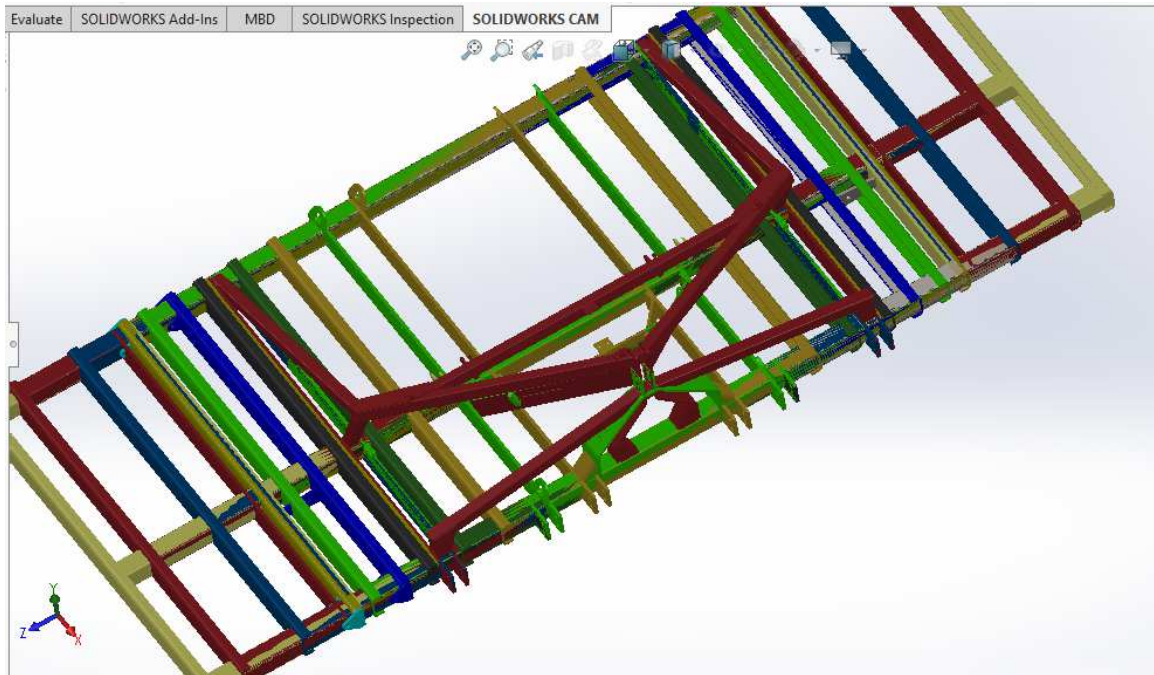
2. Modelagem matemática

As duas modelagens matemáticas apresentadas nesta seção são adaptações do modelo apresentado em Abuabara e Morabito (2009). Para ambas, dados um conjunto $j \in J$ de barras tubulares de tamanho regular b_j , e um conjunto de itens $i \in I$ de comprimentos variados l_i , deseja-se atender uma demanda de itens cortados d_i com o menor valor de perda por barra possível.

Para a decisão da alocação dos itens i nas barras b_j é necessária a criação da variável inteira X_{ij} . E, para a alocação da barra b_j , para o plano de corte, é necessária a criação de uma

variável binária Z_j que assume o valor igual a 1 se, e somente se, a barra $j \in J$ está sendo utilizada no plano de corte.

Figura 1 - Variações de comprimentos de tubos estruturais na linha de escarificador de solo



Fonte: Empresa A.

Para a determinação do valor da perda por barra, são necessárias duas variáveis: (i) a variável T_j que é responsável pela definição da sobra ou retalho. Esta decisão ocorre após algum corte de algum(ns) item/itens. Se o comprimento restante da barra após este(s) corte(s) foi suficientemente grande para a alocação de mais itens, então este comprimento restante será considerado como sobra podendo ser utilizado novamente no plano de corte, caso contrário o comprimento será considerado como perda. (ii) Se a sobra pode ser aproveitada, desta forma é necessário a criação de uma variável binária U_j igual a 1 se, e somente se, a sobra da barra $j \in J$ é maior que ψ que é parâmetro que determina o comprimento mínimo para uma sobra ser considerada como um retalho.

As inovações que o Modelo 1 apresenta são: (i) a consideração da espessura da serra que irá realizar os cortes nas barras, representada pelo parâmetro r e (ii) a definição do número máximo de retalhos ou sobras por barra, seguindo a seguinte lógica: o número máximo de retalhos é equivalente ao número máximo de itens i de menor comprimento do conjunto

$\min l_i$ que podem ser alocados no comprimento máximo das barras $\max b_j$. Essa lógica foi expandida para o número total de barras (n) do conjunto J , sendo representada pelo parâmetro $\varpi = \left\lceil \frac{\max_j b_j}{\min_i l_i} \right\rceil n$, onde o arredondamento foi utilizado para evitar erros numéricos.

Dados todos estes pré-requisitos, para a definição do Modelo 1, considere os seguintes conjuntos, parâmetros e variáveis:

Conjuntos

- I Conjunto de itens a serem cortados e
- J Conjunto de barras disponíveis.

Parâmetros

- b_j Comprimento da barra $j \in J$;
- l_i Comprimento do item $i \in I$;
- d_i Demanda do item $i \in I$;
- r Espessura da serra que irá realizar os cortes dos itens $i \in I$;
- n Quantidade total de barras disponíveis;
- ξ Número suficientemente grande;
- ψ Comprimento mínimo para uma sobra ser considerada como um retalho e
- ϖ Número máximo de sobras permitidas;

Variável de decisão inteira

- X_{ij} Quantidade de itens $i \in I$ cortados da barra $j \in J$.

Variável contínua

- T_j Define a perda por barra $j \in J$, isto é, se uma sobra T_j é maior que o limite permitido, ela é considerada perda, tal que $T_j < \psi$.

Variáveis binárias

- U_j Variável binária igual a 1 se, e somente se, a sobra da barra $j \in J$ é maior que ψ ;
- Z_j Variável binária igual a 1 se, e somente se, a da barra $j \in J$ está sendo utilizada no plano de corte.

A partir dessas definições, o Modelo 1 é dado por:

$$\min \sum_{j \in J} T_j + \left(\sum_{j \in J} Z_j \right) \left(\frac{1}{n} \right) \quad (2.1)$$

s. a

$$\sum_{i \in I} (l_i + r) X_{ij} \leq b_j \quad \forall j \in J, \quad (2.2)$$

$$\sum_{j \in J} X_{ij} = d_i \quad \forall i \in I, \quad (2.3)$$

$$\psi U_j \leq b_j Z_j - \sum_{i \in I} (l_i + r) X_{ij}, \quad \forall j \in J, \quad (2.4)$$

$$b_j Z_j - \sum_{i \in I} (l_i + r) X_{ij} \leq T_j + U_j \xi, \quad \forall j \in J, \quad (2.5)$$

$$\sum_{j \in J} U_j \leq \varpi, \quad (2.6)$$

$$X_{ij} \geq 0 \text{ e inteiro}, \quad \forall i \in I, \quad \forall j \in J, \quad (2.7)$$

$$T_j \geq 0, \quad \forall j \in J, \quad (2.8)$$

$$Z_j \in \{0,1\}, \quad \forall j \in J, \quad (2.9)$$

$$U_j \in \{0,1\}, \quad \forall j \in J. \quad (2.10)$$

Onde: $\xi \geq \max_j b_j - \min_i l_i$, $\psi = \min_i l_i$ e $\varpi = \left\lceil \frac{\max_j b_j}{\min_i l_i} \right\rceil n$.

Na função objetivo (2.1) o primeiro termo minimiza as perdas das barras e o segundo termo minimizar o número de barras utilizadas, as restrições (2.2) garantem que todos os itens cortados de uma barra não excedam o comprimento da barra, as restrições (2.3) impõem o atendimento da demanda de todos os itens. As restrições (2.4) são desigualdades válidas que determinam se haverá sobra no processo de corte da barra b_j . Conforme descrito anteriormente, a variável Z_j indica se o a barra $j \in J$ é utilizada no plano de corte ($Z_j = 1$). Se diferença entre o comprimento da barra b_j e a soma de todos os comprimentos dos itens alocados para serem cortados nesta barra $\sum_{i \in I} (l_i + r) X_{ij}$ é maior ou igual a ψ , então vai existir sobra na barra, e conseqüentemente, $U_j = 1$. As restrições (2.5) determinam o valor da perda por barra T_j como a diferença entre o comprimento da barra b_j e a soma de todos os comprimentos dos itens alocados para serem cortados nesta barra $\sum_{i \in I} (l_i + r) X_{ij}$. As

restrições (2.6) limitam o número de possíveis sobras. O conjunto de restrições (2.8) -(2.10) apresenta os domínios das variáveis.

Para a definição do Modelo 2, são utilizados os mesmos conjuntos, parâmetros e variáveis do Modelo 1. A estratégia do Modelo 2 consiste em deixar a inserção de itens adicionais à demanda pelo modelo para maximizar a utilização das barras, minimizando as sobras.

São duas características da Empresa A. que motivaram o desenvolvimento do Modelo 2. (i) a primeira característica consiste na distância e dificuldade de manipulação das barras tubulares de matérias primas (MPs) entre o ponto de armazenagem e consumo: devido ao comprimento, alto volume de material e peso das barras, o seu transporte é realizado em duas etapas, na primeira etapa um feixe de material é retirado do ponto de armazenagem por uma empilhadeira e entregue no ponto de consumo (célula de corte). Na segunda etapa, a movimentação das barras dentro da célula de corte é realizada por um pórtico que possui uma talha de uma tonelada. (ii) a segunda característica consiste no tipo de controle destas barras: estes tipos de MPs são ofertados no mercado na unidade de toneladas e são consumidos fisicamente na unidade milímetros, gerando uma dificuldade de manutenção de inventário devido as conversões numéricas. Devido a este ponto, para a Empresa A. é mais interessante realizar todas as movimentações das barras e aproveitar a MP ao máximo possível para que as sobras não retornem para o estoque. Com isso, se torna interessante antecipar o corte de itens que não apresentam demanda naquele horizonte de planejamento específico, porém vão ser consumidos nos horizontes de planejamento a frente.

Para que o Modelo 2 contempla-se estas duas características foi necessário: (i) alterar a função objetivo do Modelo 1 inserindo um novo termo que maximiza da inserção de itens nas barras disponíveis $\max \sum_{\substack{i \in I \\ j \in J}} X_{ij}$ e (ii) alterar os sinais dos outros termos para evitar a perda de generalidade, conforme apresentado a seguir:

$$\max \sum_{\substack{i \in I \\ j \in J}} X_{ij} - \sum_{j \in J} T_j - \left(\sum_{j \in J} Z_j \right) \left(\frac{1}{n} \right) \quad (2.11)$$

Na função objetivo (2.11) o primeiro termo maximiza a produção de itens, o segundo termo minimiza as perdas das barras e o terceiro termo minimiza o número de barras utilizadas.

Também foi necessário modificar as restrições (2.3) para maximizar a inserção dos itens nas barras adicionando itens adicionais à demanda, conforme a nova restrição abaixo:

$$\sum_{j \in J} X_{ij} \geq d_i \quad \forall i \in I, \quad (2.12)$$

A partir dessas definições, o Modelo 2 é dado por:

$$\max \sum_{\substack{i \in I \\ j \in J}} X_{ij} - \sum_{j \in J} T_j - \left(\sum_{j \in J} Z_j \right) \left(\frac{1}{n} \right) \quad (2.11)$$

s. a

$$\sum_{i \in I} (l_i + r) X_{ij} \leq b_j \quad \forall j \in J, \quad (2.2)$$

$$\sum_{j \in J} X_{ij} \geq d_i \quad \forall i \in I, \quad (2.12)$$

$$\psi U_j \leq b_j Z_j - \sum_{i \in I} (l_i + r) X_{ij}, \quad \forall j \in J, \quad (2.4)$$

$$b_j Z_j - \sum_{i \in I} (l_i + r) X_{ij} \leq T_j + U_j \xi, \quad \forall j \in J, \quad (2.5)$$

$$\sum_{j \in J} U_j \leq \varpi, \quad (2.6)$$

$$X_{ij} \geq 0 \text{ e inteiro}, \quad \forall i \in I, \quad \forall j \in J, \quad (2.7)$$

$$T_j \geq 0, \quad \forall j \in J, \quad (2.8)$$

$$Z_j \in \{0,1\}, \quad \forall j \in J, \quad (2.9)$$

$$U_j \in \{0,1\}, \quad \forall j \in J. \quad (2.10)$$

Onde: $\xi \geq \max_j b_j - \min_i l_i$, $\psi = \min_i l_i$ e $\varpi = \left\lceil \frac{\max_j b_j}{\min_i l_i} \right\rceil n$.



3. Resultados

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos com os Modelos 1 e 2 apresentados na seção anterior. Para tal, primeiramente são descritos todos os recursos computacionais utilizados, em segundo lugar são apresentados os dados e, por fim os resultados dos testes computacionais.

3.1 Experimentos computacionais

Os experimentos foram realizados no software GAMS 24.1.3 e resolvidos com o software de otimização de propósito geral CPLEX 12.5.1.0, em um computador com 15,9 GB de memória RAM, processador Intel® Core™ i7-3537U 2.00 GHz e sistema operacional Windows 8.1. Foi estabelecido como critério de parada um limite de tempo de 3600 segundos ou um *gap* de 0% de otimalidade.

3.2 Descrição dos dados

Os dados utilizados neste trabalho foram gentilmente disponibilizados pela Empresa A. e constituem a demanda de uma semana de planejamento para o corte dos itens que consomem a matéria prima TUBO QUADRADO 120 X 120 X 6,30 mm ASTM 36, que são apresentados pela Tabela 1. Na primeira coluna da tabela é apresentado o código do desenho do item para que os operadores da serra possam consultar informações no desenho do item, na segunda coluna é apresentado código de cadastro do item no sistema *Enterprise Resource Planning* (ERP), na terceira coluna é apresentada a descrição do item, na quarta coluna é apresentado o comprimento de corte do item na unidade milímetros e, por fim, na quinta coluna é apresentada a demanda dos itens cortados para aquela semana.

Atualmente o plano de corte da área de Usinagem da Empresa A. é realizado pelo seu supervisor com um auxílio de uma calculadora e conhecimento de alguns padrões de corte que promovem baixa perda por barra. Basicamente o método Manual utilizado para definir este plano consiste em primeiro alocar os itens de maiores comprimentos nas barras e, posteriormente, realizar contas para definir os itens candidatos que podem ser cortados das sobras existentes das barras, geradas pelo corte dos itens de maior comprimento alocados previamente.

De modo a conferir a eficiência do Modelo 1 em relação ao método Manual praticado pela Empresa A. atualmente, foi solicitado ao supervisor da Usinagem que a demanda apresentada pela Tabela 1 tivesse o plano de corte planejado pelo método Manual, o estoque de barras da MP disponíveis para o plano era de 30 barras com 6.000 mm cada barra, e a construção do plano de corte manual levou 1.500 segundos para ser elaborado.

Tabela 1 - Dados da demanda dos itens a serem cortados.

Desenho do item	Código do item	Descrição do item	Comprimento do item (mm)	Demanda (pçs)
P.TQ.00109	30151000088	TUBO 120 X 120 X 3620	3620	2
P.TQ.00110	30151000089	TUBO 120 X 120 X 1380	1380	10
P.TQ.00111	30151000090	TUBO 120 X 120 X 580	580	2
P.TQ.00112	30151000091	TUBO 120 X 120 X 1100	1100	4
P.TQ.00113	30151000092	TUBO 120 X 120 X 500	500	5
P.TQ.00115	30151000094	TUBO 120 X 120 X 340	340	2
P.TQ.00116	30151000095	TUBO 120 X 120 X 4500	4500	1
P.TQ.00117	30151000096	TUBO 120 X 120 X 939	939	3
P.TQ.00119	30151000097	TUBO 120 X 120 X 1240	1240	2
P.TQ.00120	30151000098	TUBO 120 X 120 X 640	640	3
P.TQ.00121	30151000099	TUBO 120 X 120 X 5265	5265	1
P.TQ.00126	30151000103	TUBO 120 X 120 X 2920	2920	2
P.TQ.00127	30151000104	TUBO 120 X 120 X 750	750	6
P.TQ.00128	30151000105	TUBO 120 X 120 X 2490	2490	2
P.TQ.00129	30151000106	TUBO 120 X 120 X 950	950	8
P.TQ.00130	30151000107	TUBO 120 X 120 X 1990	1990	3
P.TQ.00138	30151000115	TUBO 120 X 120 X 665	665	6
P.TQ.00158	30151000133	TUBO 120 X 120 X 1450	1450	2
P.TQ.00159	30151000134	TUBO 120 X 120 X 480	480	4
P.TQ.00160	30151000135	TUBO 120 X 120 X 5685	5685	1
P.TQ.00164	30151000136	TUBO 120 X 120 X 680	680	1
P.TQ.00168	30151000138	TUBO 120 X 120 X 1225	1225	1
P.TQ.00169	30151000139	TUBO 120 X 120 X 3870	3870	2
P.TQ.00170	30151000140	TUBO 120 X 120 X 625	625	4
P.TQ.00172	30151000142	TUBO 120 X 120 X 4185	4185	1
P.TQ.00173	30151000143	TUBO 120 X 120 X 1540	1540	1
P.TQ.00174	30151000144	TUBO 120 X 120 X 525	525	9

Fonte: Empresa A.

Este resultado é apresentado pela Tabela 2, onde a primeira coluna da tabela apresenta o comprimento de corte dos itens, da segunda a vigésima primeira coluna são apresentadas as barras a serem cortadas, onde cada célula indica o número de peças cortadas naquela barra,

nos comprimentos dos itens daquela linha. Na vigésima segunda coluna é apresentado o total de peças cortadas no comprimento daquela linha. Na parte inferior da tabela são apresentadas as sobras em cada barra.

Analisando a Tabela 2 é possível observar que foram utilizadas apenas 20 barras das 30 disponíveis e que o comprimento total da perda foi de 7.248 mm que equivalem a 160 kg de sobra de material. Um ponto que vale a pena destacar é que como a sobra da última barra foi de 5.180 mm. No processo atual da Empresa A. esta barra irá permanecer na célula de corte, ocupando área produtiva, até ser consumida nos próximos horizontes de planejamento. O custo médio de compras no último trimestre desta MP é de R\$ 10,00/kg. Com isso, o custo total da sobra de MP neste plano foi de R\$ 1.600,00.

Tabela 2 - Plano de corte realizado com método manual da Empresa A.

Compr. (mm)	Barras																				Total (pçs)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20		
3.620							1	1													2	
1.380											1	3	3	3							10	
580																		2			2	
1.100				1			2				1										4	
500																		1	4		5	
340																			1	1	2	
4.500			1																		1	
939												1	1	1							3	
1.240															2						2	
640																1	1	1			3	
5.265		1																			1	
2.920								2													2	
750							1					1	1	1		1	1				6	
2.490										2											2	
950										1					1	3	3				8	
1.990					1	1					1										3	
665				1											2	1	1	1			6	
1.450			1								1										2	
480												1								3	1	4
5.685	1																				1	
680		1																			1	
1.225															1						1	
3.870					1	1															2	
625																			4		4	
4.185			1																		1	
1.540									1												1	
525																2	2	1	4		9	
Sobra (mm)	315	55	50	50	140	140	90	160	70	1120	171	171	171	15	45	45	10	120	5180	5		

Fonte: Empresa A.

3.3 Resultados computacionais

Nesta subseção os Modelos 1 e 2 apresentados na seção 2 são avaliados, utilizado como parâmetros de entrada os dados fornecidos pela Tabela 1. Os resultados obtidos pelo Modelo 1 são apresentados Tabela 3. O modelo foi resolvido em 776 segundos com um *gap* de 0.71%.

Tabela 3 - Resultados do Modelo 1 para o exemplar da Tabela 1

Compr. (mm)	Barras																				Total (pçs)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
3620	1	1																			2
1380			1	1				3		1		1						2		1	10
580																2					2
1100													3								4
500			4																1		5
340			1		1																2
4500											1										1
939																		3			3
1240			1																1		2
640		1							1			1									3
5265					1																1
2920									1											1	2
750									1	2			3								6
2490															2						2
950				1								3							4		8
1990								3													3
665		1	1						2	1					1						6
1450										1				1							2
480	1	1														2					4
5685						1															1
680				1																	1
1225								1													1
3870																1	1				2
625								1				1						2			4
4185														1							1
1540	1																				1
525				5						1	2							1			9
Sobra (mm)	354	587	359	349	391	313	24	0	350	468	444	493	438	361	349	0	347	413	448	594	

Fonte: Produzida pelos autores

Analisando os dados da Tabela 3 é possível observar que o Modelo 1 utilizou 20 barras de 6.000 mm para o atendimento total da demanda. A sobra total gerada por este planejamento de corte foi de 7.082 mm que equivalem a 156 kg, gerando um custo de sobra de MP de R\$ 1.560,00. É possível observar que as sobras das barras foi relativamente alta podendo ser consumida por outros itens de comprimento menor. Para otimizar a redução de sobras apresentadas pela Tabela 3 foi gerado um novo cenário com a alteração da demanda de apenas os itens apresentados pela Tabela 4.



Tabela 4 - Alteração de demanda para otimização das sobras apresentadas pela Tabela 3

Desenho do item	Código do item	Descrição do item	Comprimento do item (mm)	Demanda (pçs)
P.TQ.00111	30151000090	TUBO 120 X 120 X 580	580	4
P.TQ.00115	30151000094	TUBO 120 X 120 X 340	340	13
P.TQ.00159	30151000134	TUBO 120 X 120 X 480	480	5

Fonte: Produzida pelos autores

Os resultados deste novo cenário são apresentados pela Tabela 5, onde o Modelo 1 foi resolvido em 1000 segundos com o *gap* de 0.28%.

Tabela 5 – Resultados do Modelo 1 no segundo cenário de otimização com aumento de demanda

Compr. (mm)	Barras																				Total (pçs)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
3620	1	1																			2
1380	1		1	1				2	1			1				1	1			1	10
580				1				1							1	1					4
1100				1								2							1		4
500			2	1			1												1		5
340		1		1	1		1	1			5					2					13
4500												1									1
939			1										2								3
1240															1	1					2
640							2											1			3
5265					1																1
2920																		1			2
750			1	1										2							6
2490														1					1		2
950		1						1			4								2		8
1990									2					1							3
665		1	1	2				1		1											6
1450										1					1						2
480	2										1	2									5
5685						1															1
680								1													1
1225																					1
3870							1			1											2
625			2						1						1						4
4185																			1		1
1540															1						1
525												1	1		1	4	2				9
Sobra (mm)	32	417	0	4	391	313	0	11	7	9	0	7	5	12	28	2	0	0	431	5	

Fonte: Produzida pelos autores

Analisando os dados da Tabela 5 é possível observar que neste cenário, o Modelo 1 também utilizou 20 barras de 6.000 mm para o atendimento total da demanda alterada. Entretanto, a



sobra total gerada por este planejamento de corte foi de 1.674 mm que equivalem a 36,8 kg, gerando um custo de sobra de material de R\$ 368,00.

Para a análise de performance do Modelo 2, um cenário foi avaliado com os dados de entrada fornecidos pela Tabela 1. Os resultados obtidos pelo Modelo 2 são apresentados pela Tabela 6. O modelo foi resolvido em 1000 segundos com o *gap* de 0.39%. Analisando os dados da Tabela 6 é possível observar que neste cenário, o Modelo 2 também utilizou 20 barras de 6.000 mm. Porém a sobra total de MP gerada por este planejamento de corte foi de 648 mm que equivalem a 14,2 kg, gerando um custo de sobra de material de R\$ 142,00.

Tabela 6 - Resultados do Modelo 2

Compr. (mm)	Barras																				Total (pçs)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
3620	1	1																			2
1380		1	1	1							1	1						3			2 10
580	3																				1 4
1100				1				3													4
500		1										1								3	5
340				2	2					1	2							2	1	4	2 16
4500																1					1
939																	1	1			1 3
1240								1			1										2
640									2		1										3
5265					1																1
2920												1					1				2
750									1		1			2		1				1 6	
2490			1											1							2
950			1	1							1								4	1	8
1990													3								3
665									4			1				1					6
1450							1							1							2
480		1	1												2				1		5
5685						1															1
680			1																		1
1225				1																	1
3870									1		1										2
625	1			1					2												4
4185																			1		1
1540											1										1
525									4	1		1		1	1		1				9
Sobra (mm)	5	12	10	26	49	313	0	42	20	1	62	0	24	25	7	34	3	4	2	9	

Fonte: Produzida pelos autores

Por fim, foi realizada uma análise comparativa dos quatro métodos apresentados: Manual, Modelo 1, Modelo 1 com aumento de demanda, representado por Modelo 1(*) e Modelo 2. Estes resultados são apresentados pela Tabela 7, onde na primeira coluna são apresentados os métodos, na segunda coluna é apresentado o tempo consumido para o processamento do

exemplar em segundos , na terceira coluna é apresentado o valor total da sobra de MP gerada pelo método, na quarta coluna são apresentados os custos das sobras de MPs geradas pelo plano de corte, e, por fim, na última coluna são apresentadas as porcentagens de redução de custos das sobras de MP em relação ao método Manual.

Analisando a Tabela 7 é possível observar que à medida que mais itens adicionais à demanda foram inseridos ao plano de corte para a minimização das sobras, foi promovida uma redução significativa nos custos de sobra de material. Neste sentido, o Modelo 2 é o mais indicado para implementação na Empresa A., uma vez que, a sua estratégia permitiu uma redução de 91,10% no custo das sobras de MP, comparado ao método Manual, praticado atualmente pela organização.

Tabela 7 - Análise comparativa dos quatro métodos

Método	Tempo (s)	Sobra (mm)	Sobra (R\$)	Redução (%)
Manual	1500	7.258	1.600,00	-----
Modelo 1	776	7.082	1.560,00	2,50
Modelo 1(*)	1000	1.674	368,00	77,0
Modelo 2	1000	648	142,00	91,10

Fonte: Produzida pelos autores

4. Conclusões

Neste trabalho foi realizado foram propostos dois modelos matemáticos com adaptações do trabalho de Abuabara e Morabito (2009) em uma empresa que produz máquinas agrícolas em São Carlos/SP. Os modelos foram aplicados em um problema de corte unidimensional em uma família de barras tubulares estruturais.

O Modelo 1 apresenta as seguintes inovações com relação ao modelo de Abuabara e Morabito (2009): (i) a consideração da espessura da serra que irá realizar os cortes nas barras, representada pelo parâmetro r e (ii) a definição do número máximo de retalhos ou sobras por barra, considerando que o número máximo de retalhos é equivalente ao número máximo de itens i de menor comprimento do conjunto $\min_l l_i$ que podem ser alocados no comprimento máximo das barras $\max_j b_j$.



Já o Modelo 2, apresenta as mesmas inovações do Modelo 1, porém com a estratégia a maximização da inserção de itens i nas barras b_j sem necessidade de demanda d_i . Esta estratégia foi utilizada para a minimização de sobras de MP em cada barra e foi motivada por duas características da Empresa A.: (i) a primeira característica consiste na distância e dificuldade de manipulação das barras tubulares de MPs entre o ponto de armazenagem e consumo: devido ao comprimento, alto volume de material e peso das barras e (ii) a segunda característica consiste no tipo de controle destas barras: estes tipos de MPs são ofertados no mercado na unidade de toneladas e são consumidos fisicamente na unidade milímetros, gerando uma dificuldade de manutenção de inventário devido as conversões numéricas.

Quatro métodos foram avaliados com os dados de uma semana de planejamento de uma MP, a saber, Manual, Modelo 1, Modelo 1 com aumento de demanda, representado por Modelo 1(*) e Modelo 2. Nos testes computacionais, foi possível observar que à medida que mais itens adicionais à demanda foram inseridos ao plano de corte para a minimização das sobras, promoveram uma redução significativa nos custos de sobra de material. Neste sentido, o Modelo 2 é o mais indicado para implementação na Empresa A., uma vez que, a sua estratégia permitiu uma redução de 91,10% no custo de sobra de MP em relação ao método Manual que é utilizado atualmente na Empresa A.

Ao final dos testes, se pode obter uma economia de R\$ 1.458,00 no plano de corte semanal de somente uma MP, realizando a extrapolação para as outras 25 MPs que passam pela célula de corte, é estimado pelos autores uma economia de R\$ 30.000,00/semana com as sobras de MP geradas pelos planos de corte do método Manual.

REFERÊNCIAS

Abuabara, A.; Morabito, R. **Cutting optimization of structural tubes to build agricultural light aircrafts**. Ann Oper Res, v.169: p. 149–165, 2009.

Arenales, et al. **Pesquisa Operacional: para cursos de engenharia**. Elsevier Brasil, Rio de Janeiro, 2ª edição, p. 542, 2015.