

APLICAÇÃO DE PESQUISA OPERACIONAL NO DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA DE SEQUENCIAMENTO DA PRODUÇÃO EM UMA FUNDIÇÃO DE GRANDE PORTE DE JOINVILLE

Milton Procopio de Borba (IST)
milproba@gmail.com

ALVARO PAZ GRAZIANI (IST)
alvaro.graziani@sociesc.org.br

DIEGO FERNANDES FLORISBELO (IST)
diego.fernandes@schulz.com.br



Este estudo consiste em aplicar o conceito de pesquisa operacional a fim de desenvolver uma ferramenta de sequenciamento de produção de uma fundição de grande porte da cidade de Joinville. As grandes empresas procuram recursos para melhorar o modo de programação, porém devido ao alto custo de sistemas deste gênero, acabam optando por continuar a fazer o sequenciamento de forma empírica e subjetiva, o que acaba comprometendo o tempo do programador e causando desconfiância se o sequenciamento gerado realmente é a melhor solução. Neste caso, o processo em estudo é uma fundição que apresenta uma gama diversificada de produtos com características distintas, o que implica num grande número de restrições em relação ao peso, elementos de liga e temperatura além do objetivo principal que é o atendimento dos prazos de entrega dos clientes. Com isso busca-se desenvolver um sequenciamento adequado de ordens de produção nas linhas de moldagem, combinando mix de peças leves e pesadas, de modo a obter uma demanda constante de metal líquido em equilíbrio com a oferta de metal disponível no forno, além de atender a gradiente de temperatura e também às variações de elemento de liga. Para desenvolver a ferramenta foram realizadas reuniões periódicas com monitores das áreas de fusão e moldagem a fim de estratificar as restrições e entender as dificuldades da produção, com isso foi elaborada a ferramenta utilizando o Solver, o qual indicou uma programação adequada às restrições, com rapidez e flexibilidade.

Palavras-chaves: Sequenciamento. Fundição. Restrições. Solver.

Aplicação de pesquisa operacional no desenvolvimento de uma ferramenta de sequenciamento da produção em uma fundição de grande porte de Joinville

1. Introdução

O planejamento e controle da produção é o setor da empresa que tem a função administrativa e que integra a produção às demais funções da organização através da informação. Seus objetivos também são planejar projetando o futuro e controlar a produção lidando com as variações e desvios que implicam o redesenho dos planos ou intervenções nas operações (GRAZIANI, 2012, p. 19).

O PCP se ocupa do planejamento e controle de todos os aspectos da produção, inclusive do gerenciamento de materiais, de programação de máquinas, pessoas, da coordenação de fornecedores e clientes-chave. O PCP consiste no conjunto de funções necessárias para coordenar o processo de produção, de forma a ter os produtos produzidos nas quantidades e prazos (FILHO, 2006, p. 73).

Conforme Slack et al. (1997), diante do planejamento e controle da produção quanto ao curto prazo, existem quatro atividades definidas para o programador analisar, que são:

- Carregamento: refere-se à quantidade de serviço alocado para um centro de trabalho analisando as horas disponíveis que a máquina ou equipamento tem para operação;
- Sequenciamento: condiz a qual ordem de produção deve ser seguida analisando o grau de prioridade e as restrições existentes dentro de um processo a fim de atingir um conjunto de objetivos de desempenho;
- Programação: que consiste em alocar no tempo, as atividades, obedecendo ao sequenciamento definido ao conjunto de restrição existente no centro de trabalho;
- Controle: que condiz em coletar e analisar as informações de desempenho de uma máquina, equipamento ou centro de trabalho, com a finalidade de monitorar, e se possível agir de forma corretiva quando existir um desvio de produção ou não seguimento da programação;

Para as empresas de fundição estas atividades proporcionam uma dificuldade ainda maior, pois apresentam número de clientes e variedade de produtos finais demasiadamente altos e possuem um ambiente produtivo por processo com características muito peculiares, o que influencia diretamente em uma programação de produção (TEIXEIRA JR; FERNANDES,

2006, p. 205). Portanto planejar e controlar a produção de uma fundição é extremamente complexo, devido ao grande número de variáveis que possuem em seu processo produtivo. Há restrições existentes na fusão, que são recorrentes aos tipos de liga e temperatura que devem ser selecionadas a fim de evitar setups indesejáveis e que atendam às necessidades da etapa seguinte à moldagem. Nessa etapa, os lotes devem ser sequenciados para encontrar o equilíbrio com a fusão, em relação à quantidade e peso com o objetivo de alcançar uma produção harmoniosa e que atenda à sua capacidade.

Diante dessas dificuldades e da procura das empresas pela qualidade no planejamento da produção, principalmente na programação da fundição, em virtude da quantidade de restrições, faz-se necessário que as empresas busquem uma ferramenta de programação fina da produção. Desta forma foi utilizado o Solver como ferramenta de trabalho, a fim de criar um modelo matemático para uma fundição de grande porte da cidade de Joinville o qual buscou encontrar a melhor solução de sequenciamento da programação atendendo às restrições de fusão e moldagem e objetivando na redução de custos, além de eliminar parcialmente as etapas de sequenciamento de forma manual e aumentar a confiabilidade da gerência e dos operadores na programação.

2. Características da fundição em estudo

Este artigo foi desenvolvido utilizando à área de PCP numa fundição de grande porte da região de Joinville. A organização é composta por 2.700 funcionários, sendo 1.080 pertencentes ao setor de fundição e se caracteriza por ter duas áreas de negócios muito bem estabelecidas e posicionadas no mercado.

A fundição é caracterizada por processar dois tipos de ferro. O ferro fundido cinzento que é composto por elementos à base de carbono e o ferro fundido nodular que constituído principalmente pela adição de estanho e silício. Existem vários outros elementos que constituem estes ferros podendo ser dispostos por classes, porém para modo de setup de liga, são considerados apenas cinzento e nodular e a classes são ordenadas por gradiente de elemento.

Devido à grande estrutura, a fundição foi dividida em duas partes, denominadas como Fundição I e Fundição II, para melhorar o controle e o gerenciamento de indicadores da produção. Cada unidade de produção é composta por um setor de macharia e de moldagem e

apenas um setor de fusão para suportar a demanda de cada uma. Existe também uma divisão de quebra de canal, acabamento e pintura para atender o fluxo das duas moldagens.

A estrutura da fusão é composta por cinco fornos de indução e um de armazenamento (buffer de ferro líquido), sendo que dois fornos são destinados para a Fundição I e três para a Fundição II. O processo de moldagem e desmoldagem de ambas as fundições são caracterizados por serem automatizados por meio de uma máquina de grande porte em cada uma das divisões. Este equipamento é responsável por moldar, receber o vazamento, desmoldar e resfriar as peças. A diferença é que na Fundição I o vazamento é feito através de uma panela vazadora, enquanto que na Fundição II o vazamento é feito por um forno vazador. As duas moldagens têm como meta produzir cem moldes por hora, para que no fim do dia, atinjam dois mil quatrocentos moldes. Por fim, o processo de macharia é composto por quinze máquinas, sendo que onze são atribuídas à Fundição I e as outras quatro para a Fundição II. Devido à gama diversificada de machos e equipamentos, as máquinas da macharia I podem atender à Fundição II, assim como a macharia II pode atender à Fundição I. A Tabela 1 mostra essa divisão.

Tabela 1: Divisão da fundição.

Setor	Equipamentos Totais	Fundição I	Fundição II
Fusão	5 Fornos	2 Fornos	3 Fornos
Moldagem	2 Máquinas	1 Máquina	1 Máquina
Macharia	15 Máquinas	11 Máquinas	4 Máquinas

Fonte: Autor (2013)

3. Desenvolvimento da ferramenta

O Solver foi a ferramenta utilizada para desenvolver o modelo matemático, com o objetivo de executar de forma automática e apresentar uma programação diária visando o atendimento do plano mestre e das restrições existentes no sequenciamento da fundição em estudo, que foram coletadas através de uma reunião com os monitores de fusão e moldagem. O desenvolvimento da ferramenta foi feito para a Fundição II, pois ela é mais crítica e sensível às mudanças de liga e temperatura, devido ao funcionamento com forno vazador.

As restrições que devem ser levadas em consideração no momento da programação são apresentadas na Figura 1 e as explicações das mesmas serão descritas em seguida.

Figura 1: Planilha atual de planejamento da fundição.

Item	Caixas	Liga	Data	Destino Acabamento	°C	Peso Conj. Kg	KG Total
208.260-B	290	0 - 0,020	10/mai	Acab Interno Fundicao I - BR	1340 - 1360	111,00	32.190,0
208.87-B	100	0 - 0,017	10/mai	Mavifer	1400 - 1420	69,60	6.960,0
208.47-B	125	0,020 - 0,025	10/mai	Sometal	1390 - 1410	64,62	8.077,5
14.131-B	100	0,020 - 0,025	10/mai	Sometal	1390 - 1410	47,26	4.726,0
208.136-B	100	0,020 - 0,025	10/mai	Mavifer	1390 - 1410	81,70	8.170,0
208.104-B	100	0 - 0,020	10/mai	Mavifer	1390 - 1410	77,23	7.723,0
16.44-B	35	0,020 - 0,025	10/mai	Acabpeças	1390 - 1410	70,13	2.454,6
14.213-B	100	0,045 - 0,055	10/mai	Acabpeças	1370 - 1390	83,35	8.335,0
14.212-B	100	0,045 - 0,055	10/mai	Acabpeças	1360 - 1380	94,22	9.422,0
14.197-B	100	0,035 - 0,040	10/mai	Acabpeças - BR	1370 - 1390	113,45	11.345,0
305.44-B	100	0,035 - 0,040	11/mai	Sometal - BR	1370 - 1390	143,40	14.340,0
20.80-B	200	0,080 - 0,090	11/mai	Izamac	1390 - 1410	75,45	15.090,0
28.19-B	50	3,2 - 3,3	11/mai	Acab Interno Fundicao I	1390 - 1410	140,40	7.020,0
311.59-B	50	3,2 - 3,3	11/mai	Acab Interno Fundicao I - BR	1370 - 1390	108,00	5.400,0
28.21-B	50	3,2 - 3,3	11/mai	Acab Interno Fundicao I	1410 - 1430	118,60	5.930,0
20.53-B	50	3,2 - 3,3	11/mai	Mavifer - BR	1410 - 1430	30,89	1.544,5
311.62-B	50	3,2 - 3,5	11/mai	Acab Interno Fundicao I - BR	1380 - 1400	131,20	6.560,0
311.50-B	50	3,2 - 3,5	11/mai	Acab Interno Fundicao I - BR	1390 - 1410	120,74	6.037,0
			11/mai				

Fonte: Autor (2013)

- Liga: pode ser visualizada na terceira coluna e o modelo matemático deve evitar uma alta variação de liga de um item para outro, com o objetivo de minimizar ou eliminar as paradas de máquina por setup devido a diferença de percentual de elementos de liga;
- Destino de acabamento: apresentado na quinta coluna, onde o modelo deve visar o balanceamento das quantidades de peças destinada ao acabamento interno e externo, já que existe uma baixa capacidade de produção no setor interno, criando assim um estoque intermediário indesejável. Por isso prioriza-se maior parte (70%) dos itens programados para o acabamento terceirizado;
- Temperatura: apresentada na sexta coluna, onde deve-se evitar um alto gradiente de temperatura de um item para outro, com objetivo de minimizar as paradas de máquina por setup devido ao ajuste de temperatura;

- Peso conjunto da peça: evidenciada na sétima coluna, onde o modelo deve levar em consideração uma sequência de itens com pesos balanceados, de modo a obter uma demanda constante de metal líquido em equilíbrio com a oferta de metal disponível no forno, a fim de que a moldagem possa atingir a eficiência desejada ou a meta estabelecida;
- Peso total: visualizada na oitava coluna, onde o modelo deve estabelecer uma sequência balanceada de peso total, que é a multiplicação de moldes mostrada na segunda coluna pelo peso do conjunto apresentada na sétima coluna. Essa sequência não pode passar de doze toneladas por horas, que é a capacidade do forno vazador. Por isso procura-se uma harmonia para fazer itens pesados e leves, para que não haja parada de máquina de moldagem, aguardando por metal líquido a ser vazado;

4. Resultados e Discussões

Diante das informações coletadas com os problemas existentes de restrição de fusão e moldagem, foi realizado o desenvolvimento da ferramenta atendendo às necessidades da produção e do planejador. Com o desenvolvimento do modelo matemático foram analisados os resultados e a eficácia da ferramenta.

Para desenvolver a ferramenta, primeiramente foi inserido o plano mestre no modelo matemático. Este PMP é gerado na empresa em estudo, duas vezes por semana, mostrando a necessidade de produção durante um horizonte de planejamento de quatro semanas, conforme mostra a Tabela 2.

Tabela 2: Plano mestre de produção original

Plano Mestre W37

Liga	Item	Semana	Data					Total
		ATRASO	HOJE	37	38	39	40	
Cinzento	19.02-B	44			52		35	131
	19.03-B	148				186	38	372
	19.09-B	213				774		987
	20.72-B	77	27	10	27	53	81	275
	20.74-B					25	33	58
	20.79-B	135		116		116	116	483
	311.25-B			19	25	32	26	102
	311.63-B	114		87	83	83	66	433
	34.02-B	116					138	254
	35.01-B	81	52		52	52	52	289
	35.09-B	82		33		33	33	181
	35.11-B	138	47	180	139	137	180	821
	Nodular	08.14-B					32	
14.226-B		90	99	297	99	644	326	1555
14.227-B		121		169	157	173	149	769
14.240-B		216	26	94	112	95	77	620
14.252-B				39	65		33	137
14.76-B			31	118	154	108	153	564
14.77-B		55	23	141	164	118	133	634
16.20-B		179	112	568	637	572	562	2630
16.21-B				44	622	492	491	1649
16.63-B		101	99	741	612	715	579	2847
16.64-B				175	234	268	212	889

Fonte: Autor (2013)

Devido às limitações do Solver, foi necessário customizar a demanda do plano para três dias. Além disto, foi necessário desmembrar a demanda de ferro cinzento do plano mestre, já que o cinzento é composto por carbono e o ferro nodular de estanho e silício. O gradiente de liga entre eles é muito alto e esta restrição não era reconhecida pelo Solver. Nota-se também que houve alterações nos itens, devido à redução do horizonte do plano mestre. A Tabela 3 mostra o plano mestre customizado de forma a atender as restrições do solver.

Tabela 3: Plano mestre de produção customizado

Plano Mestre W37

		Semana	Data			
		ATRASO	HOJE	37	38	
Liga	Item			09/09	16/9/2013	17/9/2013
Nodular	08.14-B					
	08.15-B	20				
	14.227-B	121		33	58	25
	14.240-B	216	26	17	35	17
	14.241-B					
	14.247-B	11				12
	14.253-B					9
	16.20-B	179	112	112	112	218
	16.68-B					
	16.73-B					20
	16.74-B	34	26	50	21	30
	16.75-B	42	38	74	38	43
	16.77-B				35	35
	17.09-B					51
	17.10-B					8
	17.15-B					
	208.112-B					
	208.129-B					
	208.130-B					
	208.150-B	96				
	208.151-B	86				
	208.160-B				9	97
	208.161-B					

Fonte: Autor (2013)

Após a inserção do plano mestre, foram inseridas as informações sobre as características dos itens produzidos na Fundação II, como:

- Peso unitário da peça;
- Peso do conjunto;
- Gradiente de liga (Sn + Si);
- Destino do acabamento;
- Número de figuras que representa a quantidade de peças oriundas em cada molde;
- Temperatura de processamento; e
- Demanda máxima e mínima que cada item pode produzir em um dia.

Estas informações podem ser visualizadas na Tabela 4.

Tabela 4: Detalhamento dos itens.

Item	Peso Unitário da Peça	Peso unitário do Conjunto	Número de figuras	Sn + Cu		Destino Acabamento	Temperatura		Mínimo se tiver demanda	Máximo
08.14-B	17,35	156	6	0,045	0,055	Sometal	1390	1410	50	150
08.15-B	15,85	144,36	6	0,045	0,055	Sometal	1390	1410	50	150
14.151-B	22,05	148,5	4	-	0,010	Acab Interno Fundicao I	1410	1430	50	100
14.197-B	18,02	113,45	4	0,035	0,040	Acab Interno Fundicao I - BR	1370	1390	50	100
14.199-B	50,47	190,05	2	-	0,015	Acab Interno Fundicao I - BR	1390	1410	50	100
14.207-B	10,8	67,5	3	0,020	0,025	Acab Interno Fundicao I	1390	1410	50	200
14.226-B	11,53	149,13	7	0,015	0,020	Acab Interno Fundicao II	1390	1410	50	200
14.227-B	10,03	130,74	8	0,015	0,020	Acab Interno Fundicao II	1390	1410	50	200
14.228-B	9,95	122	8	0,015	0,020	Acab Interno Fundicao II	1390	1410	50	200
14.238-B	43,15	116,18	2	0,040	0,050	Mavifer	1370	1390	50	100
14.239-B	27,3	156	4	0,040	0,050	Sometal	1370	1390	50	100
14.240-B	11,8	113,55	6	-	0,015	Acab Interno Fundicao I	1390	1410	100	100
14.241-B	42,9	136	2	0,020	0,025	Acab Interno Fundicao I - BR	1360	1380	50	100
14.245-B	30,5	106	2	0,040	0,050	Acabpecas - BR	1370	1390	50	100
14.247-B	30,9	142,65	2	0,045	0,055	Acab Interno Fundicao I	1400	1420	30	100
14.248-B	30,9	142,65	2	0,045	0,055	Acab Interno Fundicao I	1400	1420	30	100
14.251-B	20,7	96	3	0,035	0,040	Acab Interno Fundicao I	1390	1410	50	100
14.252-B	21,3	174,65	6	0,040	0,050	Acab Interno Fundicao II	1370	1390	50	100
14.253-B	16,57	137	6	0,040	0,050	Acab Interno Fundicao II	1360	1380	50	100
14.74-B	6,87	101,57	10	0,020	0,025	Acab Interno Fundicao II	1390	1410	50	100
14.76-B	5,72	109,24	9	0,020	0,025	Sometal	1390	1410	50	200
14.77-B	8,8	118,38	8	0,020	0,025	Acab Interno Fundicao I	1380	1400	50	150
16.20-B	9,45	103	6	-	0,015	Acab Interno Fundicao I	1390	1410	200	400
16.21-B	10,32	89	6	-	0,015	Acab Interno Fundicao I - BR	1390	1410	200	400
16.61-B	31,59	179,3	4	0,025	0,030	Acab Interno Fundicao I	1390	1410	50	100

Fonte: Autor (2013)

Inicialmente foram calculadas as demandas provisórias com base no plano mestre. Após a inclusão destas demandas e das características necessárias dos itens, deu-se início ao modelamento matemático levando em consideração as seguintes etapas:

1) Para fazer a programação diária considerando três dias, foi analisado a demanda do plano mestre para os respectivos horizontes, a fim de atingir a produção de dois mil quinhentos moldes que é a meta diária da fundição. Para tanto, quando este objetivo não é alcançado, a folga é preenchida proporcionalmente com a demanda em atraso. Por conseguinte foi analisada a maior demanda dos três dias programados e registrado ao lado do plano, informando a posição que ocupa dentro do período analisado, conforme mostra a Tabela 5.

Tabela 5: Detalhamento da demanda.

Plano mestre W37							Mínimo provisório 1				
							amanhã	depois	+depois	máx	pos.
		Semana	Data Produção								
		ATRASO	HOJE	35		36					
Item	Peças por Molde			29/08	30/08	02/09					
14.226-B	8	157	99		99	99	21	126	114	126	2
14.227-B	8	22	29	33	66		36	69	2	69	2
307.14-B	4						0	0	0	0	1
307.15-B	5	15					2	2	1	2	1
307.17-B	1		41				0	0	0	0	1
311.07-B	1	3	78				0	0	0	0	1
311.08-B	1		10				0	0	0	0	1
311.37-B	2			7			7	0	0	7	1
311.55-B	1	325	90			90	45	57	121	121	3
311.58-B	1	236		55			87	41	23	87	1
311.64-B	1	137					19	24	13	24	2
311.65-B	1	139					19	24	13	24	2
311.66-B	6						0	0	0	0	1
311.73-B	1			2			2	0	0	2	1
33.03-B	2	300	45	14	14	21	55	67	50	67	2
36.02-B	5				94		0	94	0	94	2
36.04-B	6	32		19		26	23	5	29	29	3
Total		4846	1639	1723	1543	1926					
Percentual			0,157	0,140	0,177	0,098					
Diferença			761	677	857	474					
Meta Dia			2400	2400	2400	2400					

Fonte: Autor (2013)

2) Após o conhecimento das demanda dos três dias analisados, foi comparada a programação de cada dia com as quantidades mínimas de fabricação, que variam de acordo com o item. Quando a soma dos três dias forem inferiores a quantidade mínima, o valor passa a ser o número informado como mínimo na posição do primeiro dia. Se na operação a quantidade total do dia ultrapassar a meta estabelecida, o mesmo é realocado para o segundo dia, e assim por diante. Caso a demanda for superior à mínima, os valores continuam os mesmos. Mas se a programação for maior que a máxima, o saldo será o limite. Estas observações são mostradas na Tabela 6.

Tabela 6: Detalhamento da demanda revisada.

Plano mestre W37						Mínimo provisório 1			Mínimo provisório 2			Mínimo provisório 3			Total/3 dias	Mín/dia	Max/dia						
						amanhã	depois	+depois	máx pos.	amanhã	depois	+depois	Min pos.	amanhã				depois	+depois	Min pos.			
Item	Peças/Molde	Semana	Data Prod.																				
		ATRASO	HOJE	35	36				1	2	3			1	2	3							
14.226-B	8	157	99	99	99	21	126	114	126	2	21	126	114	21	1	21	126	114	21	1	355	50	200
14.227-B	8	22	29	33	66	36	69	2	69	2	36	69	2	2	3	36	69	2	2	3	121	50	200
307.14-B	4					0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	50	200
307.15-B	5	15				2	2	1	2	1	50	0	0	50	1	50	0	0	50	1	15	50	100
307.17-B	1		41			0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	50	300
311.07-B	1	3	78			0	0	0	0	1	50	0	0	50	1	50	0	0	50	1	3	50	100
311.08-B	1		10			0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	50	150
311.37-B	2		7			7	0	0	7	1	50	0	0	50	1	50	0	0	50	1	7	50	100
311.55-B	1	325	90		90	45	57	121	121	3	45	57	121	121	3	45	57	121	121	3	415	50	75
311.58-B	1	236		55		87	41	23	87	1	87	41	23	87	1	87	41	23	87	1	291	50	100
311.64-B	1	137				19	24	13	24	2	19	24	13	24	2	19	24	13	24	2	137	50	100
311.65-B	1	139				19	24	13	24	2	19	24	13	24	2	19	24	13	24	2	139	50	100
311.66-B	6					0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	50	100
311.73-B	1		2			2	0	0	2	1	50	0	0	50	1	50	0	0	50	1	2	50	100
33.03-B	2	300	45	14	14	55	67	50	67	2	55	67	50	67	2	55	67	50	67	2	349	50	200
36.02-B	5				94	0	94	0	94	2	0	94	0	94	2	50	0	50	50	1	94	50	100
36.04-B	6	32		19	26	23	5	29	29	3	23	5	29	29	3	50	50	0	50	1	77	50	100
Total		4846	1639	1723	1543	1926																	
Percentual			0,157	0,140	0,177	0,098																	
Diferença			761	677	857	474																	
Meta Dia			2400	2400	2400	2400																	

Fonte: Autor (2013)

3) Depois que foi calculada a demanda provisória para os três dias, de forma a atender os limites de produção máxima e mínima, foi elaborada uma fórmula para classificar os itens por temperatura e liga para os dias programados. Esta classificação segue a forma de uma “onda”, iniciando com as porcentagens de liga baixo, aumentando os valores e novamente diminuindo, chegando até aos valores semelhantes aos do princípio. A Tabela 7 mostra o caso, destacado em azul.

Tabela 7: Amostra da classificação das ligas.

Classificação das ligas	Mínimo			Máximo	Item	SnCu_m	SnCu_M	Tmin	Tmax	Kg_molde	Min	Max	Mínimo			Máximo	
	amanhã	depois	+depois										amanhã	depois	+depois	por dia	Máximo
24 54	9	24	0	50	1	14.74-B	0,02	0,025	1390	1410	101,57	50	100	0	50	50	50
25 13	10	25	0	50	82	208.245-B	0,02	0,025	1390	1410	135	50	100	0	50	50	82
26 53	11	26	67	122	66	257.09-B	0,025	0,03	1360	1380	225,74	34	34	34	34	34	255
27 14	12	27	0	50	87	208.163-B	0,025	0,03	1380	1400	197,44	50	100	0	50	50	87
28 52	1	28	50	0	0	311.07-B	0,03	0,035	1360	1380	78	50	100	50	0	0	50
29 15	2	29	50	0	0	7 311.37-B	0,03	0,035	1370	1390	166	50	100	50	0	0	50
30 51	3	30	50	50	137	311.64-B	0,03	0,035	1380	1400	159	50	100	50	50	50	100
31 16	4	31	0	50	89	16.76-B	0,035	0,04	1380	1400	230	50	100	0	50	50	89
32 50	1	32	50	0	77	36.04-B	0,04	0,05	1370	1390	186,19	50	100	50	0	0	77
33 17	2	33	0	70	67	208.210-B	0,045	0	1390	1410	142	70	140	0	70	0	70
34 49	3	34	50	0	99	208.271-B	0,045	0,055	1380	1400	148	50	100	50	0	50	99
35 18	4	35	50	50	128	14.252-B	0,04	0,05	1370	1390	174,65	50	100	50	50	50	100
36 48	1	36	50	50	139	311.65-B	0,03	0,035	1380	1400	175,8	50	100	50	50	50	100
37 19	2	37	50	0	74	208.38-B	0,03	0,035	1380	1400	144	50	100	50	0	50	74
38 47	3	38	50	0	94	36.02-B	0,03	0,035	1360	1380	166,7	50	100	50	0	50	94
39 20	4	39	50	0	2	311.73-B	0,03	0,035	1350	1370	220	50	100	50	0	0	50
40 46	5	40	50	50	57	16.73-B	0,025	0,03	1380	1400	210	50	80	50	50	0	57
41 21	1	41	114	114	121	349 33.03-B	0,02	0,025	1390	1410	137,44	50	200	114	114	121	200
42 45	2	42	50	0	21	208.235-B	0,02	0,025	1390	1410	116	50	100	50	0	0	50
43 22	3	43	50	50	122	208.46-B	0,02	0,025	1380	1400	99,44	50	100	50	50	50	100
44 44	4	44	0	100	98	208.29-B	0,02	0,025	1380	1400	127,59	100	200	0	0	100	100
45 23	5	45	50	0	6	208.213-B	0,02	0,025	1380	1400	130	50	200	50	0	0	50
46 43	6	46	48	53	72	16.74-B	0,02	0,025	1380	1400	118	50	100	50	53	72	100
47 24	7	47	90	81	82	14.77-B	0,02	0,025	1380	1400	118,38	50	150	90	81	82	150
48 42	8	48	50	0	50	76 16.68-B	0,02	0,025	1370	1390	208	50	50	50	0	50	50
49 25	9	49	109	108	198	415 311.55-B	0,02	0,025	1360	1380	235,21	50	75	75	75	75	415

Fonte: Autor (2013)

4) Em seguida, foram transferidos os dados da Tabela 7 para o modelo. Também foram considerados outros dados na execução da ferramenta, como:

- Hora de produção e turno: informa o momento exato em que os itens devem ser produzidos, resultando em uma melhor rastreabilidade e também serve como base para liberação das ordens de produção. O turno também deve ser levado em consideração, já que alguns índices de produção e qualidade são medidos nesse intervalo de tempo;
- Diferenças de caixas: onde se compara a quantidade de caixas de moldes que o Solver vai calcular para ser feito com a quantidade de moldes que realmente podem ser produzidos com o metal disponível no forno. O valor em absoluto da soma dessas diferenças teve como objetivo minimizá-la, pois com isso obtêm-se um melhor aproveitamento dos recursos, portanto este resultado foi considerado a célula objetivo do Solver;
- Peso total: que é a quantidade de moldes multiplicada pelo peso do conjunto do item;
- Diferença de tonelagem: que considera a diferença de metal disponível no forno pela quantidade de metal necessário para processar os moldes que serão calculados pelo Solver;

Com isso, os parâmetros do Solver podem ser definidos conforme Figura 2.

Figura 2: Parâmetros do Solver.

Minimizar $\sum Csa - Cv $	Onde:
Sujeito a:	Csa – Caixas solucionadas pelo Solver acumuladas.
$\left\{ \begin{array}{l} Cs \leq Cpm \\ Cs \geq Dpv \\ Cs = NI \\ \sum Csa \leq 2500 \end{array} \right.$	Cv – Caixas que poderiam ser moldadas com metal disponível.
	Cs – Caixas solucionados pelo Solver.
	Cpm – Capacidade máxima por dia de cada item.
	Dpv – Demanda prévia prevista por dia de cada item.
	NI – Números inteiros

Fonte: Autor (2013)

Após se conhecer as células de restrição e a objetivo, foi possível estabelecer as células variáveis e o resultado do cálculo da quantidade de caixas de molde que apontado como a melhor solução. Na Tabela 8 podem ser visualizadas estes dados.

Tabela 8: Resultado do Solver.

		Célula objetivo 50900																		
Tempo		Diferença de Caixas			Solução	Demanda				Restrições/Informações				Diferença de Peso						
Hora	Turno	Dif. Caixas	Cxs possí.	Cxs acum.	Cxs - Solver	Item	Amanhã	Depois	+depois	Máx/dia	Peso molde	Liga	Temperatura	Peso total	Peso acum.	Peso disp.	Dif. Peso			
0 h 20	1	29	63	34	34	27.12-B	34	34	34	34	222	-0,015	0	1360	1380	7548	7548	4080	3468	
0 h 20	1	29	63	34	0	307.15-B	0	0	0	50	20	0	0,01	1390	1410	0	7548	4080	3468	
0 h 20	1	29	63	34	0	16.21-B	0	0	200	200	10,32	0	0,015	1390	1410	0	7548	4080	3468	
0 h 41	1	31	99	68	34	27.10-B	0	34	0	34	126	0	0,02	1370	1390	4284	11832	8160	3672	
2 h 41	1	154	114	268	200	16.20-B	200	200	200	400	9,45	0	0,015	1390	1410	1890	13722	32160	18438	
3 h 37	1	233	128	361	93	307.09-B	93	93	93	200	17,55	0	0,01	1380	1400	1632	15354	43320	27966	
3 h 37	1	233	128	361	0	27.16-B	0	0	0	50	0	0,01	0,02	1370	1390	0	15354	43320	27966	
3 h 37	1	233	128	361	0	27.31-B	0	0	0	50	0	0,015	0,02	1370	1390	0	15354	43320	27966	
3 h 37	1	233	128	361	0	27.28-B	0	50	0	50	0	0,015	0,02	1370	1390	0	15354	43320	27966	
4 h 25	1	301	141	442	81	302.183-B	81	50	87	150	18,63	0,015	0,02	1380	1400	1509	16863	53040	36177	
4 h 55	1	347	145	492	50	14.226-B	50	130	118	200	11,53	0,015	0,02	1390	1410	577	17440	59040	41600	
5 h 16	1	370	156	526	34	302.178-B	34	34	34	34	38,98	0,015	0,02	1380	1400	1325	18765	63120	44355	
6 h 17	1	454	175	629	103	302.182-B	103	56	99	150	22,1	0,015	0,02	1380	1400	2276	21041	75480	54439	
6 h 47	1	485	194	679	50	17.10-B	50	0	0	81	45,53	0,015	0,02	1370	1390	2277	23318	81480	58162	
7 h 17	1	516	213	729	50	17.09-B	50	0	0	100	45,53	0,015	0,02	1370	1390	2277	25594	87480	61886	
7 h 38	1	500	263	763	34	208.151-B	34	0	0	34	175	0,02	0,025	1350	1370	5949	31543	91560	60017	
7 h 38	1	500	263	763	0	208.290-B	0	0	0	50	0	0,02	0,025	1370	1390	0	31543	91560	60017	
9 h 38	2	676	287	963	200	208.30-B	200	100	106	200	14,7	0,02	0,025	1380	1400	2940	34483	115560	81077	
9 h 38	2	676	287	963	0	208.213-B	0	0	0	50	14,93	0,02	0,025	1380	1400	0	34483	115560	81077	
9 h 38	2	676	287	963	0	208.245-B	0	0	0	82	30,6	0,02	0,025	1390	1410	0	34483	115560	81077	
10 h 15	2	714	311	1025	62	33.03-B	62	73	57	200	45,75	0,02	0,025	1390	1410	2837	37320	123000	85680	
10 h 15	2	714	311	1025	0	208.275-B	0	0	0	50	39,4	0,02	0,025	1380	1400	0	37320	123000	85680	
10 h 45	2	753	322	1075	50	16.74-B	50	50	57	100	25,23	0,02	0,025	1380	1400	1262	38581	129000	90419	
10 h 45	2	753	322	1075	0	16.64-B	0	50	50	50	54,88	0,02	0,025	1370	1390	0	38581	129000	90419	
10 h 45	2	753	322	1075	0	14.241-B	0	50	0	60	42,9	0,02	0,025	1360	1380	0	38581	129000	90419	
11 h 5	2	748	361	1109	34	27.09-B	34	34	34	34	140,1	0,025	0,03	1360	1380	4762	43343	133080	89737	
11 h 5	2	748	361	1109	0	208.38-B	0	50	0	74	28,78	0,03	0,035	1380	1400	0	43343	133080	89737	

Fonte: Autor (2013)

5. Comparação das programações

Com a programação realizada pelo Solver concluída, foi possível fazer o comparativo com o sequenciamento feito anteriormente à ferramenta.

O sequenciamento utilizado anteriormente era feito de forma manual, através de análise de carteira de pedidos e do plano mestre de produção, item a item, sem considerar as características de temperatura e liga de cada peça, mas apenas baseado no conhecimento tácito do planejador.

A ferramenta permitiu agilizar a programação, minimizar o tempo do programador com análises operacionais e facilitar no caso de possíveis alterações na programação que podem ocorrer durante o dia. Com o modelo é possível realizar ajustes nos parâmetros de lead time e estoque de segurança de cada item, permitindo executar um sequenciamento mais adequado.

A Tabela 9 mostra como a programação era realizada anteriormente a elaboração da programação pelo Solver.

Tabela 9: Programação atual.

Item	Turno	Cxs	Recurso	Sn	Data planejada	Destino Acabamento	ºC	Peso Conj. Kg	KG TOTAL I
16.76-B	3	50	HWS 2	0,035 - 0,040	08/out	Acab Interno Fundicao I	1380 - 1400	230,00	11.500,0
208.271-B	3	50	HWS 2	0,045 - 0,055	08/out	Acab Interno Fundicao II	1380 - 1400	148,00	7.400,0
33.03-B	3	100	HWS 2	0,030 - 0,035	08/out	Acabpecas - BR	1390 - 1410	137,44	13.744,0
208.193-B	3	50	HWS 2	0,030 - 0,035	08/out	Sometal	1380 - 1400	180,83	9.041,5
311.66-B	3	50	HWS 2	0,030 - 0,035	08/out	Acab Interno Fundicao I	1370 - 1390	229,24	11.462,0
36.02-B	3	60	HWS 2	0,030 - 0,035	08/out	Mavifer - BR	1370 - 1390	166,70	10.002,0
208.38-B	1	50	HWS 2	0,030 - 0,035	08/out	Sometal -Pint Antes	1380 - 1400	144,00	7.200,0
208.151-B	1	34	HWS 2	0,020 - 0,025	08/out	Acab Interno Fundicao II	1360 - 1380	296,00	10.064,0
208.46-B	1	100	HWS 2	0,020 - 0,025	08/out	Mavifer - Pint Antes	1380 - 1400	99,44	9.944,0
16.75-B	1	75	HWS 2	0,020 - 0,025	08/out	Sometal	1380 - 1400	96,00	7.200,0
208.247-B	1	20	HWS 2	0,020 - 0,025	08/out	Mavifer	1380 - 1400	164,00	3.280,0
208.30-B	1	80	HWS 2	0,020 - 0,025	08/out	Sometal -Pint Antes	1380 - 1400	127,59	10.207,2
14.76-B	1	100	HWS 2	0,020 - 0,025	08/out	Sometal	1380 - 1400	109,24	10.924,0
208.47-B	1	230	HWS 2	0,020 - 0,025	08/out	Sometal	1380 - 1400	64,62	14.862,6
16.63-B	2	80	HWS 2	0,020 - 0,025	08/out	Acabamento Izamac	1380 - 1400	175,74	14.059,2
27.31-B	2	10	HWS 3	0,015 - 0,020	08/out	Acab Interno Fundicao I	1370 - 1390	162,00	1.620,0
311.58-B	2	100	HWS 4	0,015 - 0,020	08/out	Acab Interno Fundicao I	1380 - 1400	149,00	14.900,0
17.34-B	2	5	HWS 2	0,015 - 0,020	08/out	#N/D	1390 - 1410	44,00	220,0
307.12-B	2	300	HWS 2	0 - 0,013	08/out	Acab Interno Fundicao II -BR	1380 - 1400	133,00	39.900,0
16.20-B	2	200	HWS 2	0 - 0,010	08/out	Mavifer - Pint Antes	1390 - 1410	103,00	20.600,0
307.17-B	2	100	HWS 2	0 - 0,010	08/out	Acab Interno Fundicao II -BR	1390 - 1410	122,65	12.265,0

Fonte: Autor (2013)

6. Conclusão

A utilização do Solver para a solução de programação se mostrou eficiente e rápida, pois forneceu um sequenciamento coerente com as necessidades da empresa, levando em consideração as seguintes restrições do processo:

- Temperatura de vazamento;
- Variação da liga;
- Destino de acabamento;
- Peso do conjunto e peso total.

Como as características da indústria de fundição são muito complexas e peculiares, as restrições existentes no processo da empresa em estudo dificultaram a realização do modelamento matemático, que primeiramente precisou ser customizado ao processo, fazendo fórmulas que antecederam a sua resolução, além de ter que desmembrar os dois diferentes tipos de ferro. Essa preparação foi necessária devido as restrições existentes no processo da empresa em estudo, ultrapassar a capacidade de resolução do Solver. No entanto, essas alterações possibilitaram um sequenciamento adequado às restrições, com rapidez e flexibilidade.

A solução encontrada, no entanto, se limita à empresa em estudo ou à empresas com processos similares, pois o modelo foi criado especificamente considerando as características da organização em questão. Este modelamento, no entanto pode ser facilmente adaptado, inclusive pra fins comerciais, para empresas que possuem problemas para sequenciamento de operações.

A comparação de programação feita anteriormente com a realizada pelo Solver permitiu agilizar a programação e minimizar o tempo do programador com análises operacionais, e facilitando no caso de alterações na programação que normalmente ocorrem durante o dia. Com o modelo é possível realizar ajustes nos parâmetros de lead time e estoque de segurança de cada item, possibilitando um sequenciamento mais adequado às situações encontradas.

Outra vantagem é que com uma programação apropriada para três dias permitiu-se obter:

- Melhor planejamento e aproveitamento dos recursos empresariais;
- Adequação da capacidade do forno;
- Ajuste da quantidade de pessoas na linha de montagem;
- Redução do número de horas extras;
- Diminuição de perdas de produção e desperdícios; e
- Diminuição de defeitos por falta de qualidade como rechupe e solda fria oriundas da alta variação de liga e temperatura.

A utilização da ferramenta Solver, melhorou o atendimento do plano mestre e da carteira de clientes e em consequência disso, melhorou o desempenho de entrega e a diminuição de fretes extras, o que desencadeou em um menor custo para a empresa.

REFERÊNCIAS

FILHO, João Severo. Administração de logística integrada. 2. ed. Rio de Janeiro: E- Papers, 2006.

GRAZIANI, Álvaro Paz. Planejamento, Programação e Controle da Produção. Palhoça: UnisulVirtual, 2012.

SLACK, Nigel; CHAMBERS, Stuart; JOHNSTON, Robert; HARLAND, Christine; HARRISON, Alan. Administração da Produção. 1.ed. São Paulo: Atlas, 1997.

TEIXEIRA JR, Rodolfo; FERNANDES, Flávio Cesar Faria. Sistema de Apoio à Decisão para Programação da Produção em Fundições de Mercado. Gestão & Produção. São Paulo, v. 13, n. 12, p. 205-221, maio/agosto. 2006.