

SEQÜÊNCIAS DE PASSES OTIMIZADAS NA LAMINAÇÃO DE TIRAS A FRIO

Regina Fátima Gibson Gonçalves

Horacio Helman

Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Elétrica/Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 30161-970, Belo Horizonte, MG, Brasil. E-mail: regina_fatima@uol.com.br

Resumo

Neste trabalho, apresenta-se um método de otimização de seqüências de passes em relação à máxima produtividade do equipamento, ou ao mínimo consumo de energia elétrica, que atenda às limitações impostas pelo equipamento, às condições de segurança da operação e à geometria desejada para o produto. O método de cálculo foi desenvolvido utilizando os conceitos da lógica difusa e dos algoritmos genéticos. A lógica difusa foi empregada na obtenção de seqüências de passes viáveis, para serem posteriormente submetidas a um algoritmo genético capaz de identificar aquela que corresponda a um dos objetivos propostos. O método foi instrumentado em microcomputador e aplicado a exemplos típicos de laminação. Dentre suas aplicações práticas, pode-se citar a análise da influência das condições operacionais sobre a produção e sobre o consumo de energia elétrica e a avaliação do efeito da adoção de diferentes graus de exigência relativos à qualidade do produto sobre a capacidade de produção.

Palavras-chave: Laminação de tiras, Lógica difusa, Algoritmos genéticos.

1. INTRODUÇÃO

Quando se deseja submeter um material a uma dada redução de espessura por meio de uma operação de laminação, é frequente se deparar com uma situação na qual seja impossível atingir a geometria final desejada por meio de um único passe. Nestes casos, deve-se calcular uma seqüência de passes que leve à geometria pretendida, respeitando as limitações impostas pelo equipamento e pelas condições de segurança da operação.

A determinação de uma seqüência de passes corresponde à definição de um conjunto de valores para as variáveis que caracterizam a operação e é realizada a partir de critérios de cálculo preestabelecidos. Na literatura são encontrados diversos métodos de cálculo de seqüências de passes, porém cada um deles é baseado em apenas um dos critérios usuais. Neste trabalho, emprega-se um método desenvolvido, utilizando-se a lógica difusa, para permitir a combinação de diferentes critérios em um mesmo cálculo.

A solução para o problema do cálculo de seqüências de passes normalmente não é única. A escolha da seqüência de passes a ser adotada em uma dada aplicação é feita, então, em função de objetivos adicionais, tais como o requisito de que o consumo de energia elétrica seja o menor possível, ou que a produtividade do equipamento seja máxima, por exemplo.

Neste tipo de problema, são frequentes os casos em que o número de soluções viáveis é muito grande, o que leva à necessidade de se recorrer a um método de otimização para se escolher a solução mais indicada. Neste trabalho, apresenta-se um método, utilizando

algoritmos genéticos, que permite que se escolha a seqüência de passes que satisfaça a um dos dois objetivos citados.

2. CÁLCULO DAS SEQÜÊNCIAS DE PASSES

A literatura sobre o cálculo de seqüências de passes evidencia sua importância, por influenciar as características do produto final, a produtividade do equipamento e o desgaste dos cilindros, dentre outras variáveis operacionais.

A filosofia básica nesses projetos é a de se aproveitar ao máximo a produtividade do equipamento em uso, respeitando-se condições impostas pelas interações entre, por exemplo, geometria desejada, coroa térmica e carga de laminação. Há diversos critérios para se estabelecer uma seqüência de passes. Pode-se dividir estes critérios em dois grandes grupos: aqueles nos quais o parâmetro principal é a produtividade, apresentados por Helman (1988), por Sarmiento et al. (1988) e por Ávila & Helman (1989), e aqueles nos quais esse parâmetro é a forma da tira, apresentados por Bryant (1973), por Nakajima (1985), por Pataro et al. (1994), por Batista & Helman (1995) e por Shigaki & Helman (1998).

Do exposto, observa-se que há na literatura diversos métodos de cálculo de seqüência de passes, mas cada um deles é desenvolvido contemplando apenas um dos critérios.

Para os propósitos deste trabalho, foi empregado um método de cálculo de seqüência de passes desenvolvido utilizando os conceitos da lógica difusa e descrito em Gonçalves (s.d.), que permite que se contemple mais de um critério ao mesmo tempo (sendo cada um deles parcialmente atendido). Para isto, são estabelecidas faixas de valores aceitáveis para a carga e a potência de laminação e para a coroa da tira em cada passe. Estas faixas variam de acordo com o peso relativo atribuído a cada critério de cálculo, sempre respeitando os limites de faixas mais amplas, que correspondem a limites impostos pelas características do equipamento e pelo nível mínimo admissível de qualidade geométrica do produto.

3. OTIMIZAÇÃO DAS SEQÜÊNCIAS DE PASSES

Os problemas de otimização aparecem em muitas áreas da indústria, sendo constantemente despendidos esforços na determinação das melhores formas de realização de processos existentes ou projetados.

Numerosas técnicas de otimização têm sido propostas com o objetivo de aprimorar o projeto e o desempenho dos sistemas de engenharia. Apesar da grande variedade de técnicas disponíveis (Box et al., s.d.), não há nenhum método inteiramente satisfatório em todo o espectro de problemas com os quais se defronta o engenheiro. Há uma dualidade entre os conceitos de busca e otimização, de forma que todo problema de busca pode ser considerado um problema de otimização e vice-versa. Embora o objetivo de uma busca possa ser a localização de um valor máximo ou de um valor mínimo, qualquer problema de otimização pode ser expresso como um problema de localização de um ponto de máximo. Via de regra, esta estratégia é adotada.

Normalmente os cálculos são iterativos, o que introduz uma grande dificuldade, relacionada à convergência. Um ponto de mínimo nunca será atingido, mas pode-se eventualmente chegar a um ponto de sela, ou a um máximo local e não ao máximo global. Nenhum método iterativo pode garantir que localizará o máximo global. O problema de se decidir se já se atingiu a convergência é muito difícil.

Ribeiro Filho et al. (1994) e Tanomaru (1995a) classificam as técnicas de busca em três grandes grupos (técnicas baseadas em cálculos, enumerativas e probabilísticas), com uma sé-

rie de subgrupos. Os algoritmos genéticos¹, procedimentos de busca com base filosófica na biologia molecular, incluem-se no grupo das técnicas probabilísticas. Na literatura são encontrados diversos exemplos de utilização dos algoritmos genéticos em uma série de aplicações, apresentadas por Ribeiro Filho et al. (1994), Tanomaru (1995b), Pearce & Cowley (1996) e Man et al. (1996).

O problema de otimização de que trata este trabalho consiste na busca do conjunto de pesos relativos para os critérios de cálculo de seqüências de passes que propicie a melhor forma de realização do processo de laminação de tiras a frio, representada pela obtenção da máxima produção horária, ou, alternativamente, do mínimo consumo de energia elétrica, atendendo a certas condições relativas ao processo e ao produto. Trata-se, portanto, de um problema não-linear, multi-variável e multimodal, caso típico para a aplicação de algoritmos genéticos.

O procedimento da busca inicia-se com a obtenção da população inicial. Representa-se cada indivíduo desta população em forma codificada, avaliam-se as funções de adequabilidade para cada indivíduo, identificam-se os melhores indivíduos e constrói-se a roleta. Forma-se a geração seguinte, aplicando-se os operadores de reprodução, recombinação e mutação, e repete-se o procedimento, até que as condições de convergência sejam atingidas. Sua principal limitação relaciona-se ao tempo de processamento, sendo a maior parte deste tempo consumida no cálculo da adequabilidade dos indivíduos.

Para instrumentação do algoritmo apresentado, foi elaborado um programa para micro-computador, em linguagem C, sendo seu fluxograma simplificado apresentado na Figura 1. O programa é modularizado, o que o torna mais versátil, no sentido de permitir sua aplicação, com facilidade, a outras aplicações. São contempladas as particularidades descritas a seguir.

O tamanho da população é um dado de entrada do programa. A obtenção da população inicial é feita aleatoriamente. Foi adotada uma representação cromossômica em cadeia binária com 16 dígitos para cada variável. Desta forma, a precisão dos resultados irá depender da faixa de valores aceitáveis para cada variável (informada na fase de entrada de dados), sendo, no mínimo, de 3 casas decimais, já que a maior faixa de variação prevista é de 0 a 10.

O critério de seleção é o da roleta modificada. Inicialmente, as adequabilidades absolutas são elevadas a uma potência, cujo expoente é escolhido na fase de entrada de dados do programa². Estes valores são acumulados. As adequabilidades relativas são calculadas dividindo-se as novas adequabilidades absolutas por este total. A área da roleta correspondente a cada indivíduo é proporcional à sua adequabilidade relativa. Quanto maior o valor do expoente, mais seletiva será a roleta. Antes de se iniciar os cálculos para a construção da roleta, os piores indivíduos são substituídos por cópias do melhor indivíduo já localizado. A quantidade de indivíduos que será substituída em cada geração é escolhida na fase de entrada de dados do programa.

Para garantir a presença de informação nova em todas as gerações e ao mesmo tempo evitar a necessidade de adoção de uma alta probabilidade de mutação, apenas uma parcela de cada geração nova provém da aplicação dos operadores genéticos aos indivíduos da geração anterior. Os indivíduos restantes são obtidos da mesma maneira que os da população inicial. O número de indivíduos que serão gerados com este procedimento é também um dos dados de entrada do programa. Esta prática equivale à realização de duas buscas simultâneas, uma genética e outra aleatória. Os resultados da busca aleatória alimentam a busca genética.

¹ Uma importante característica dos algoritmos genéticos é trabalhar partindo não de um ponto inicial, como no caso dos métodos de otimização tradicionais, mas de um conjunto de pontos. Cada um destes pontos, ou soluções candidatas, é referenciado como sendo um indivíduo e o conjunto de pontos, uma população. A cada iteração, denominada geração, são realizados sorteios entre os indivíduos. A forma mais usual para possibilitar estes sorteios é construir-se uma roleta, com uma subdivisão para cada indivíduo, de tal forma que indivíduos que apresentem melhor desempenho tenham maior probabilidade de serem sorteados.

² A função de adequabilidade deve ser definida de tal forma que as adequabilidades absolutas dos indivíduos nunca sejam negativas, caso se escolha um expoente ímpar para esta operação.

É adotada operação de recombinação simples, a partir de um ponto da cadeia escolhido aleatoriamente. A operação de mutação é efetuada em um ponto da cadeia, também escolhido aleatoriamente.

O critério de convergência leva em conta um número mínimo de gerações e um certo número de gerações estagnadas (estes números fazem parte dos dados de entrada do programa). O conceito de estagnação refere-se apenas ao valor da função no ponto de máximo, sem levar em conta estagnação das coordenadas do ponto, já que o programa destina-se principalmente à otimização de funções com mais de uma ocorrência do valor máximo.

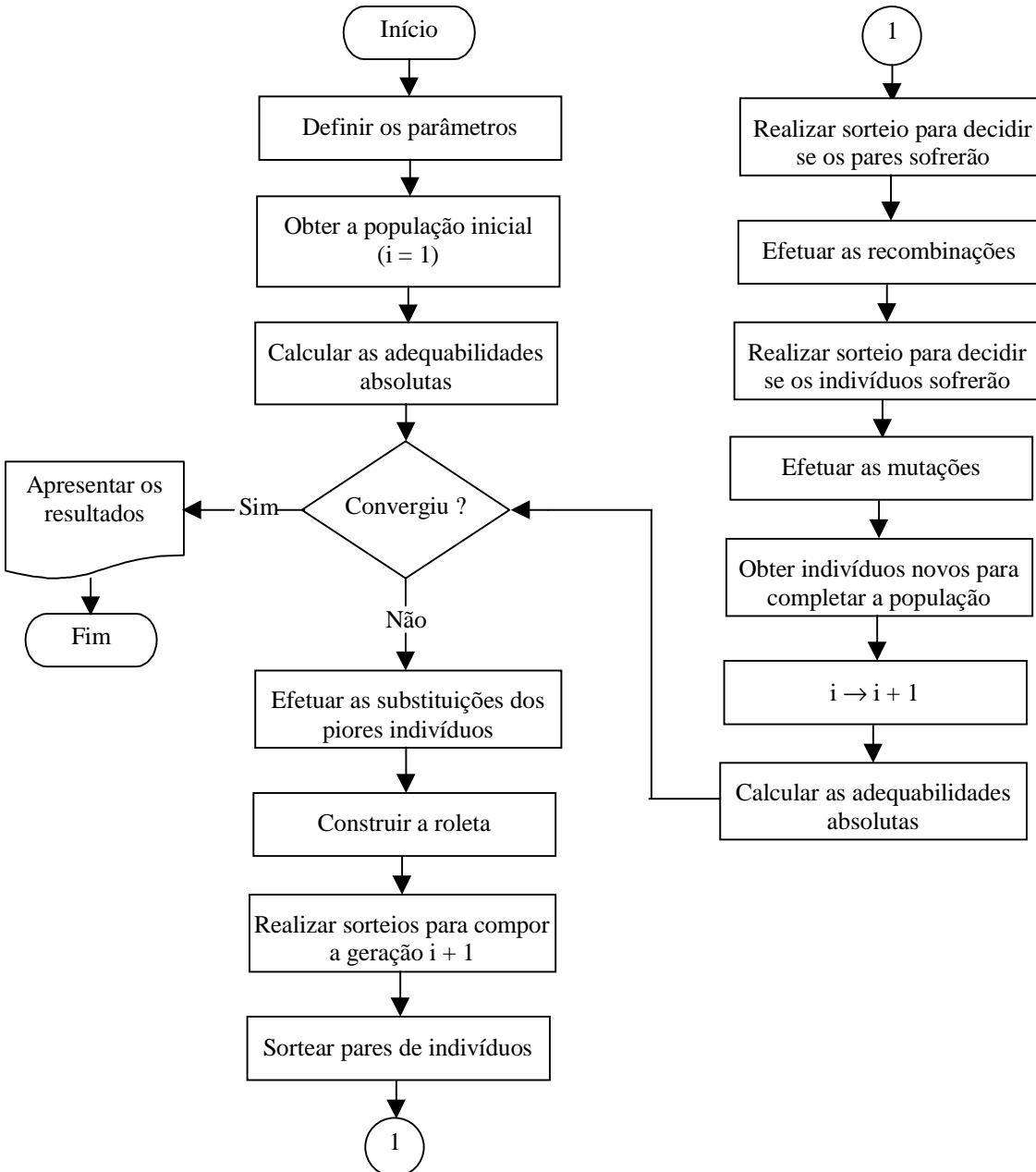


Figura 1 - Fluxograma simplificado

4. EXEMPLOS DE APLICAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

Os exemplos apresentados foram executados em um microcomputador Pentium II de 266 MHz. Os tempos de processamento informados são todos referentes a esta máquina.

No primeiro exemplo, o programa foi utilizado para realizar 2 buscas sucessivas, sendo a primeira com o objetivo de obter a máxima produção horária e a segunda, o mínimo consumo de energia elétrica, na laminação de uma tira de aço, utilizando-se um laminador quádruplo. Os dados de entrada utilizados estão listados no Apêndice 1.

Os cálculos são realizados permitindo ajustes nos valores de velocidade de laminação e de tensões a frente e a ré, na determinação de cada passe.

Para a busca relativa à máxima produção horária, o resultado, obtido em 915 segundos, corresponde a uma seqüência com 6 passes, com uma produção de 54,822 t/h e um consumo de energia elétrica de 40,693 kWh/t. No caso da busca relativa ao mínimo consumo de energia elétrica, o resultado, obtido em 2482 segundos, conduziu a uma seqüência com 11 passes, consumo de 40,220 kWh/t e produção de 25,532 t/h.

Observa-se que, neste exemplo, ao se buscar a máxima produção, o consumo de energia para a melhor seqüência de passes é 1,2% maior do que o mínimo consumo de energia elétrica encontrado. Entretanto, quando se visa obter o mínimo consumo de energia elétrica, a produção horária de tiras é de apenas 46,6% da produção máxima verificada.

As condições de cálculo das seqüências de passes influenciam estes valores, de tal forma a provocar variações significativas tanto no acréscimo de consumo de energia em relação ao valor mínimo, quando se otimiza em relação à máxima produção, como na redução da produção, em relação à máxima, que se impõe quando a otimização é feita em relação ao mínimo consumo de energia. Entretanto, pode-se observar que, de modo geral, a variação de consumo de energia elétrica não se apresenta muito significativa, enquanto a produção horária apresenta variações sensivelmente maiores, o que desencoraja a adoção do mínimo consumo de energia como objetivo de projeto. Esta diferença de comportamento reflete-se inclusive nos tempos de processamento, que são mais longos quando o objetivo da busca é o mínimo consumo de energia elétrica.

Alguns aspectos relativos à influência da escolha das condições de cálculo das seqüências de passes são discutidos a seguir.

A análise apresentada é apenas ilustrativa das potencialidades do método desenvolvido, já que uma análise suficientemente criteriosa para permitir a formulação de conclusões genéricas sobre esse comportamento demandaria uma quantidade de simulações que fugiria ao escopo deste trabalho. Como a variação de consumo de energia elétrica usualmente não é muito expressiva, a análise será restrita a buscas relativas à máxima produção horária.

A Figura 2 ilustra os resultados obtidos mantendo-se os dados do primeiro exemplo, porém variando-se a largura da tira, a diferença de temperatura entre seu centro e suas bordas (ΔT) e a coroa mecânica imposta aos cilindros.

Pode-se observar que, neste caso, os valores de produção horária crescem com o valor da largura da tira. O valor máximo de produção (110,204 t/h) foi obtido para uma tira com 1100 mm de largura, sendo laminada com uma coroa imposta de 0,015 mm e 60°C de diferença de temperatura entre seu centro e suas bordas. O pior resultado (3,618 t/h) foi encontrado para uma tira com 1000 mm de largura, laminada com uma coroa imposta de 0,045 mm e 20°C de diferença de temperatura entre seu centro e suas bordas.

Analizando-se o efeito da variação de um parâmetro de cada vez, conclui-se que o aumento da coroa mecânica reduz os valores de produção, enquanto o aumento da diferença de temperatura produz o efeito inverso. Com relação à qualidade dimensional da tira, o melhor resultado³ foi obtido para uma tira com 1000 mm de largura, laminada com uma coroa imposta de 0,015 mm e 60°C de diferença de temperatura entre seu centro e suas bordas. Nestas condições a produtividade é de 97,297 t/h. É importante notar que um aumento na qualidade geométrica da tira nem sempre é acompanhado de uma redução na produtividade.

³ Correspondente à seqüência de passes com o maior peso do critério da coroa (9,53).

A Figura 3 ilustra os resultados obtidos mantendo-se os dados do primeiro exemplo, porém variando-se a largura da mesa, a diferença de temperatura entre o centro e as bordas da tira (ΔT) e a coroa mecânica imposta aos cilindros.

Neste caso, observa-se que o efeito da variação da largura da mesa sobre os valores de produção horária não apresenta um padrão uniforme. Com relação à coroa mecânica e à diferença de temperatura entre o centro e as bordas da tira, nota-se uma tendência de aumento da produtividade com o aumento da diferença de temperatura e com a redução da coroa mecânica. Entretanto, esta tendência não se confirma em alguns casos, como ilustra a figura. O valor máximo de produção (102,467 t/h) foi obtido para uma mesa com 1500 mm de largura, com uma coroa imposta de 0,015 mm e 40°C de diferença de temperatura entre o centro e as bordas da tira. O pior resultado (3,618 t/h) foi encontrado para uma tira com 1000 mm de largura, laminada com uma coroa imposta de 0,045 mm e 20°C de diferença de temperatura entre seu centro e suas bordas.

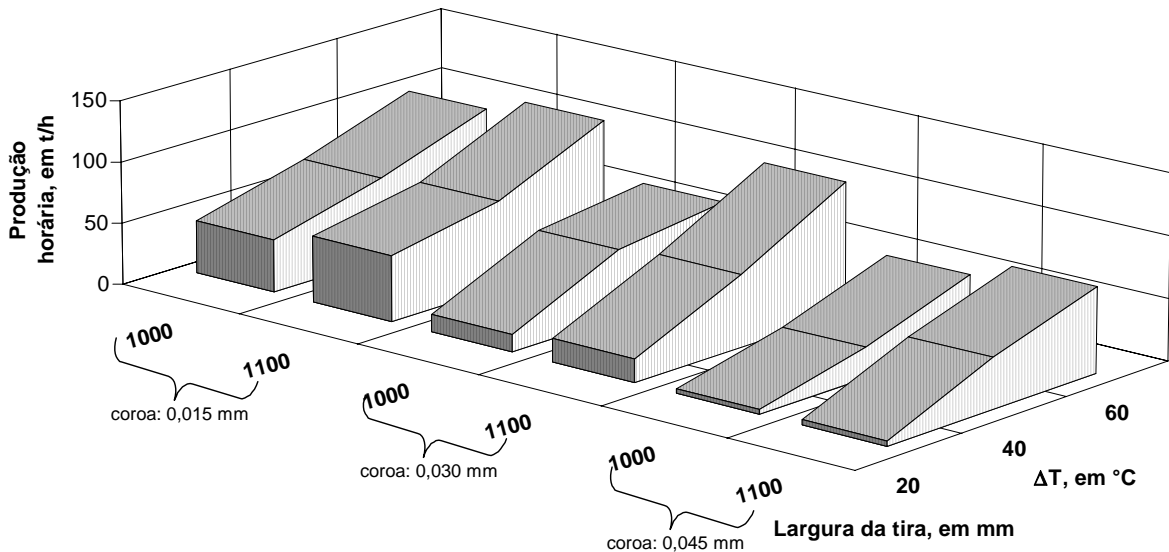


Figura 2 - Influência de parâmetros sobre a produção horária, mantida a largura da mesa

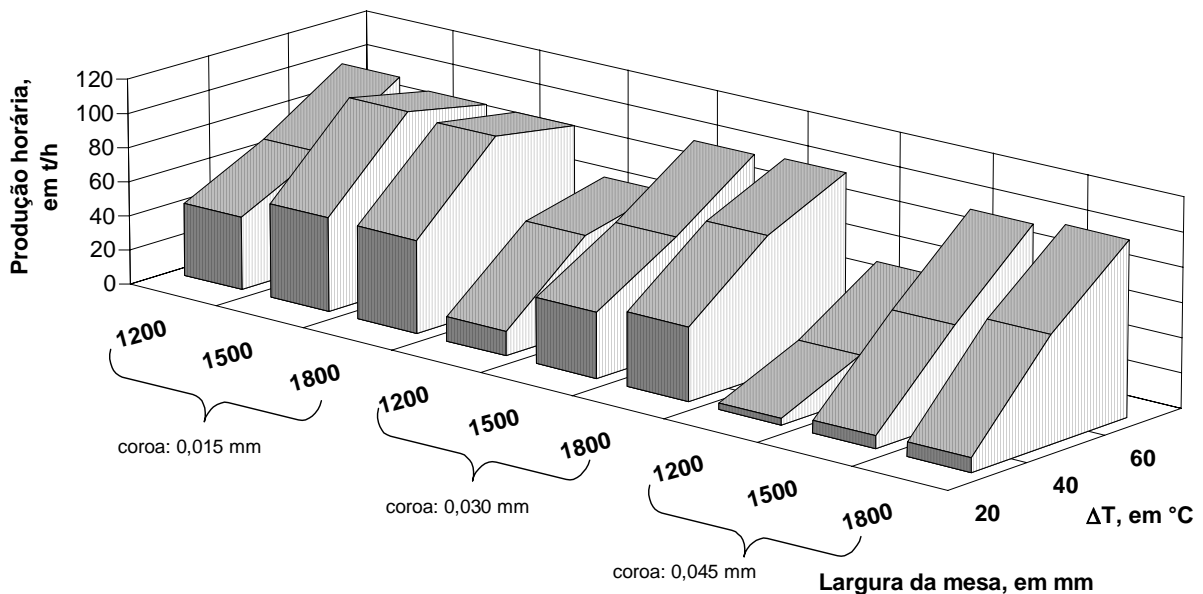


Figura 3 - Influência de parâmetros sobre a produção horária, mantida a largura da tira

5. CONCLUSÕES

A busca genética, como qualquer outro método numérico de otimização, não garante que o ponto de ótimo global seja realmente localizado. Além disto, o tempo de processamento necessário para que a busca se complete pode variar significativamente de uma simulação para outra, mesmo que o resultado final seja o mesmo.

Observa-se também que os valores dos parâmetros da busca devem ser cuidadosamente escolhidos, para que a busca seja eficaz, no menor tempo de processamento possível. Entretanto, esta escolha, além de não ser trivial, não pode ser amplamente generalizada.

Um fato que merece destaque é a ocorrência de valores de produtividade semelhantes, para diferentes condições operacionais. Nestes casos, observa-se que os valores do peso do critério da coroa, em geral, são distintos. Estes pesos estão relacionados às coroas das tiras laminadas, de tal forma que, quanto maiores seus valores, menores as variações de coroa, em relação ao valor objetivado, nos diversos passes. Uma alternativa aparentemente promissora seria a escolha da seqüência de passes que apresentasse, conjuntamente, os maiores valores de produtividade e de peso do critério da coroa. Pode-se pensar, inclusive na realização de buscas com objetivos mais complexos, que levem em conta, também, outros fatores que sejam relevantes nesta escolha e que poderiam ser definidos, por exemplo, com o auxílio da lógica difusa. A maneira como o programa foi escrito permite que seja adaptado facilmente para atender a tais modificações.

As conclusões a respeito da influência dos parâmetros sobre os resultados não podem ser generalizadas, em função do reduzido número de casos estudados. Entretanto, tornam-se evidentes as potencialidades do método apresentado, que pode ser utilizado no dimensionamento de equipamentos para novas instalações, na determinação de condições operacionais econômicas, em levantamentos de custos, etc.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ÁVILA, A. F., HELMAN, H. Um modelo matemático para um laminador “tandem” a frio. *RBCM - J. Of the Braz. Soc. Mech. Sc*, v.11, n.2, p.157-170, 1989.
- BATISTA, J. C., HELMAN, H. Modelo matemático para controle de planicidade de tiras de aço. In: SEMINÁRIO DE LAMINAÇÃO. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METAIS, 37, 1995, Curitiba. Anais... p.327-344.
- BRYANT, G. F. *Automation of tandem mills*. London: The Iron And Steel Institute, 1973. 412p.
- BOX, M. J., DAVIES, D., SWANN, W. H. *Mathematical and statistical techniques for industry; monograph no.5 - non-linear optimization techniques*. Published for Imperial Chemical Industries Limited by Oliver & Boyd, 60p.
- GONÇALVES, R. F. G. *Otimização de seqüências de passes no processo de laminação*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG. s. n. t. (Tese, Doutorado em Engenharia Metalúrgica, em andamento).
- HELMAN, H. *Fundamentos da laminação de produtos planos*. São Paulo: ABM-FCO, 1988. 396p.
- MAN, K. F., TANG, K. S., KWONG, S. Genetic algorithms: concepts and applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, New York, v.43, n.5, p.519-534, oct. 1996.
- NAKAJIMA, K. et al. New plate mill draft scheduling system for crown and flatness control. *Transactions ISIJ*, Tokyo, v.25, n.3, p.212-218, mar. 1985.
- PATARO, C. D. M., RESENDE, P., HELMAN, H. Geração Automática de uma seqüência de passes na laminação de produtos planos. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 49, 1994, São Paulo. Anais... v.5, p.365-372.

- PEARCE, R., COWLEY, P. H. Use of fuzzy logic to describe constraints derived from engineering judgment in genetic algorithms. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, New York, v.43, n.5, p.535-540, oct. 1996.
- RIBEIRO FILHO, J. L., TRELEAVEN, P. C., ALIPPI, C. Genetic-algorithm programming environments. *IEEE Computer*, p.28-43, jun. 1994.
- SARMENTO, E. C., PIORKO, I., HELMAN, H. A temperatura da tira como parâmetro de um modelo de cálculo de escala de passes de um laminador "tandem" a frio. *Metalurgia - ABM*, São Paulo, v.44, n.373, p.1260-1264, dez. 1988.
- SHIGAKI, Y., HELMAN, H. Uma análise crítica do critério de carga constante no processo de laminação. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 53, 1998. Anais...
- TANOMARU, J. Motivação, fundamentos e aplicações de algoritmos genéticos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE REDES NEURAIAS, 2, ESCOLA DE REDES NEURAIAS, 3, 1995a, Curitiba.
- TANOMARU, J. Planejamento de mão-de-obra por um algoritmo genético. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE REDES NEURAIAS, 2, ESCOLA DE REDES NEURAIAS, 3, 1995b, Curitiba.

Apêndice I

Dados da tira:

Peso da bobina	15 t	Deformação logarítmica prévia	0
Largura	1000 mm	Coroa objetivada	2,5 % de h_f
Espessura de entrada	6 mm	Coroa máxima admissível	4% de h_f
Espessura de saída (h_f)	1,5 mm		

Dados da operação e critérios de cálculo:

Coeficiente de atrito	0,1	Tensões a frente e a ré máximas	85
Dif. de temperatura entre bordas e centro	40°C	Temperatura máxima admissível da tira	160°C
Coef. de transferência térmica ..	3000 kcal/m ² /h/°C	Carga de laminação nominal	800 t
Velocidade de laminação nominal	300 m/min	Potência de laminação nominal	1800 kW
Tensões a frente e a ré nominais ⁴	75	Pesos admissíveis dos critérios de cálculo ⁵ ..	0 a 10
Tensões a frente e a ré mínimas	5		

Dados da busca genética:

Tamanho da população	250 indivíduos	Probabilidade de recombinação	0,6
Número mínimo de gerações	10	Probabilidade de mutação	0,001
Número de gerações estagnadas	5		

Máxima produção horária Mínimo consumo de energia

Grau de sensibilidade da roleta	1	2
Número de indivíduos novos em cada geração	1	4
Número de indivíduos eliminados em cada geração	6	1

Dados do equipamento:

Carga máxima de laminação	1000 t	Distância entre apoios	2250 mm
Potência máxima de laminação	3000 kW	Semi-comprimento do pescoço	375 mm
Velocidade máxima de laminação	450 m/min	Rendimento dos motores de acionamento	1
Aceleração	0,11 m/s ²	Módulo de rigidez do laminador	500 t/mm
Diâmetro dos cilindros de trabalho	300 mm	Precisão do ajuste da abertura dos cilindros	0,001 mm
Diâmetro dos cilindros de encosto	1100 mm	Coroa mecânica imposta por usinagem .	0,030 mm
Largura da mesa	1200 mm	Módulo de Poisson	0,31
Distância percorrida pela tira entre 2 passes consecutivos	8 m		
Tempo necessário para a inversão do sentido de laminação	5 s		
Diâmetro do pescoço dos cilindros de encosto	830 mm		
Módulo de Young dos cilindros de trabalho e de encosto	2245 MPa		
Módulo de cisalhamento dos cilindros de trabalho e de encosto	866 MPa		
Coeficiente de expansão linear	11 x 10 ⁻⁶ mm/mm/°C		

⁴ As tensões a ré e a frente são expressas em percentagem das tensões de escoamento da tira à entrada e à saída do passe.

⁵ As relações entre esses pesos e as faixas de valores admissíveis são lineares, sendo que, para pesos nulos as faixas de valores aceitáveis se estendem de 0 até os limites máximos admissíveis e, para pesos máximos, as faixas de valores aceitáveis são compreendidas entre $\pm 1\%$ dos valores nominais escolhidos.