

## OTIMIZAÇÃO DA MALHA DE POSICIONAMENTO DOS CASSETES DO QUEBRADOR DE CAREPAS DE UMA LINHA DE RECOZIMENTO E DECAPAGEM DE AÇOS INOXIDÁVEIS: UMA SOLUÇÃO MATEMÁTICA<sup>1</sup>

Romero de Souza Araújo<sup>2</sup>  
Robson Wander Silva Souza<sup>3</sup>

### Resumo

O Quebrador de Carepas é um processo de decapagem mecânica de bobinas recozidas, que remove carepas através de alongamento e flexão. O posicionamento de cada cassete é realizado por cilindros hidráulicos e uma malha de controle com um medidor linear de posição acoplado ao cilindro. Quando ocorre o deslocamento dos cilindros, o cassete percorre a trajetória de um raio, sendo necessário um cálculo matemático a partir de cotas e ângulos do sistema mecânico para obter a penetração efetiva. O cálculo apresentava erros de posição maiores que 10 mm, provocando deficiência da decapagem mecânica e inserção de defeitos no material. Uma solução matemática foi encontrada: realizar medição topográfica do posicionamento efetivo dos cassetes e correlacioná-la com o deslocamento real dos cilindros. A partir dos dados levantados um polinômio foi identificado e inserido no PLC existente em substituição ao posicionamento atual, simplificando e garantindo a precisão do posicionamento. Após a implementação, foi calibrado, testado e colocado em funcionamento, apresentando um erro inferior a 1 mm.

**Palavras-chave:** Quebrador de carepas; Cassetes; Posicionamento.

## LOOP OPTIMIZATION POSITIONING OF SCALE BREAKER TAPE OF ANNEALING AND PICKLING LINE OF STAINLESS STEEL: A MATHEMATICAL SOLUTION

### Abstract

The scale breaker is a process of mechanical descaling coil annealed for scale removed by stretching and bending. The position of each tape is carried out by hydraulic cylinders and a control loop with a gauge coupled to the linear position of the cylinder. When the displacement of the cylinders, the tape travels the path of a ray, requiring a mathematical calculation from the dimensions and angles of the mechanical system for effective penetration. The calculation of position errors had greater than 10 mm, causing failure of the mechanical descaling and insertion of defects in the material. A mathematical solution was found: to perform topographic measurements of the effective positioning of the cassettes and correlate it with the actual displacement of the cylinders. The data collected from a polynomial has been identified and inserted into the existing PLC to replace the current position, simplifying and ensuring the accuracy of positioning. After deployment, been calibrated, tested and placed in operation, with an error less than 1 mm.

**Key words:** Scale breaker; Tape; Positioning.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 16º Seminário de Automação e TI Industrial, 18 a 21 de setembro de 2012, Belo Horizonte, MG.*

<sup>2</sup> *Mestre em engenharia elétrica, Engenheiro eletricitista da gerência de manutenção central da Aperam em Timóteo – MG.*

<sup>3</sup> *Analista de Sistemas, Analista de automação da gerência de tecnologia de automação industrial da Aperam em Timóteo - MG.*

## 1 INTRODUÇÃO

Desde a implantação em 1995, o Quebrador de Carepas da linha de Recozimento e Decapagem N<sup>o</sup> 3 (RB3) da Aperam apresentava problemas de posicionamento dos cassetes relacionados a desvios de posição. Quando ocorre o deslocamento dos cilindros, o cassete desloca em torno de um raio, sendo necessário um cálculo matemático a partir de cotas e ângulos do sistema mecânico para obter a penetração efetiva, que é usada para controle da posição e indicação ao operador. Foram feitas várias tentativas de eliminar os desvios calibrando a malha de posição existente, mas em função da complexidade dos cálculos e da dependência dimensional não se conseguiu atingir os limites de desvios do manual de operação e da prática operacional.

Para solução desse problema utilizou-se recursos matemáticos através da aplicação de interpolação polinomial e aproximação de funções, com auxílio de algoritmo iterativo processado por computador.

Uma coleta de dados reais do processo utilizando sensores de posição existentes e medição de posição por topografia possibilitou caracterizar o problema e obter um modelo matemático análogo ao sistema real, possibilitando a implantação de uma nova malha de controle de posição.

O trabalho tem como objetivos modelar o sistema e implementar uma nova malha de controle para posicionamento dos cassetes visando simplificar a malha de posicionamento dos cassetes, atender aos limites desvios de posição, reduzir defeitos na superfície do material em processo, individualizar a entrada de dados dos diâmetros dos cassetes, eliminar a necessidade de utilização de famílias de cassetes e reduzir custos com retífica de cilindros.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 O Sistema Mecânico Quebrador de Carepas

A cabine do quebrador de carepas é formada por três conjuntos de cassetes, sendo cada conjunto composto por um cassete superior e um cassete inferior. O cassete superior é móvel, deslocando-se para promover o dobramento do material em relação ao cassete inferior que é fixo, conforme mostra a Figura 1. Os cassetes 1 e 2 são responsáveis pelo dobramento do material, provocando um efeito desempenadeira, que quebra a carepa e o cassete 3 é responsável pela forma, ou seja, a planicidade do material em processo. Na entrada e saída da cabine existem ainda dois rolos que garantem a linha de passe do material e roletes de encosto sustentam os rolos cassete, não permitindo sua deformação.

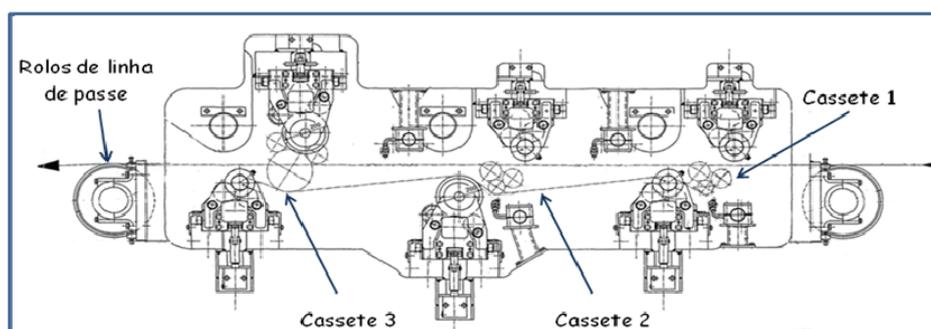


Figura 1. Sistema mecânico de posicionamento dos cassetes.<sup>(1)</sup>

## 2.2 Malha de Posição Original

A malha de posicionamento dos cassetes é do tipo malha fechada, com uma referência de posição em milímetros a partir do supervisor e um controlador de posição que recebe a referência e a posição do sistema. O valor da referência de posição é selecionado de acordo com o material em processo e inserido individualmente para cada cassete que está montado na parte superior. Estes valores significam quanto o conjunto deve descer a partir da linha de passe. Quanto maior o valor de penetração do conjunto, maior será o dobramento do material em cima do rolo inferior, provocando o alongamento desejado e a remoção da carepa incrustada no material em processo. Um valor de penetração maior ou menor que o objetivado na pode provocar marca de rolo cassete no material ou a remoção deficiente da carepa incrustada na superfície da tira.

Como se trata de um sistema de malha fechada é necessário o retorno de posição do cassete superior. A medição da posição real é realizada a partir de um sensor de posição linear denominado "tempsonics", acoplado à parte traseira do cilindro, medindo assim o deslocamento da haste através de um magneto, com uma precisão de 0,02 milímetros.

A posição efetiva que o cassete atinge leva em consideração as cotas mecânicas do conjunto e a trajetória do cassete durante seu posicionamento. Para isso utiliza-se um algoritmo que corrige a referência de posição, calculando o deslocamento da haste do cilindro para obter a penetração desejada e outro algoritmo inverso, que a partir da medição da posição do cilindro calcula a posição real atingida pelo cassete e indica ao operador (Figura 2).

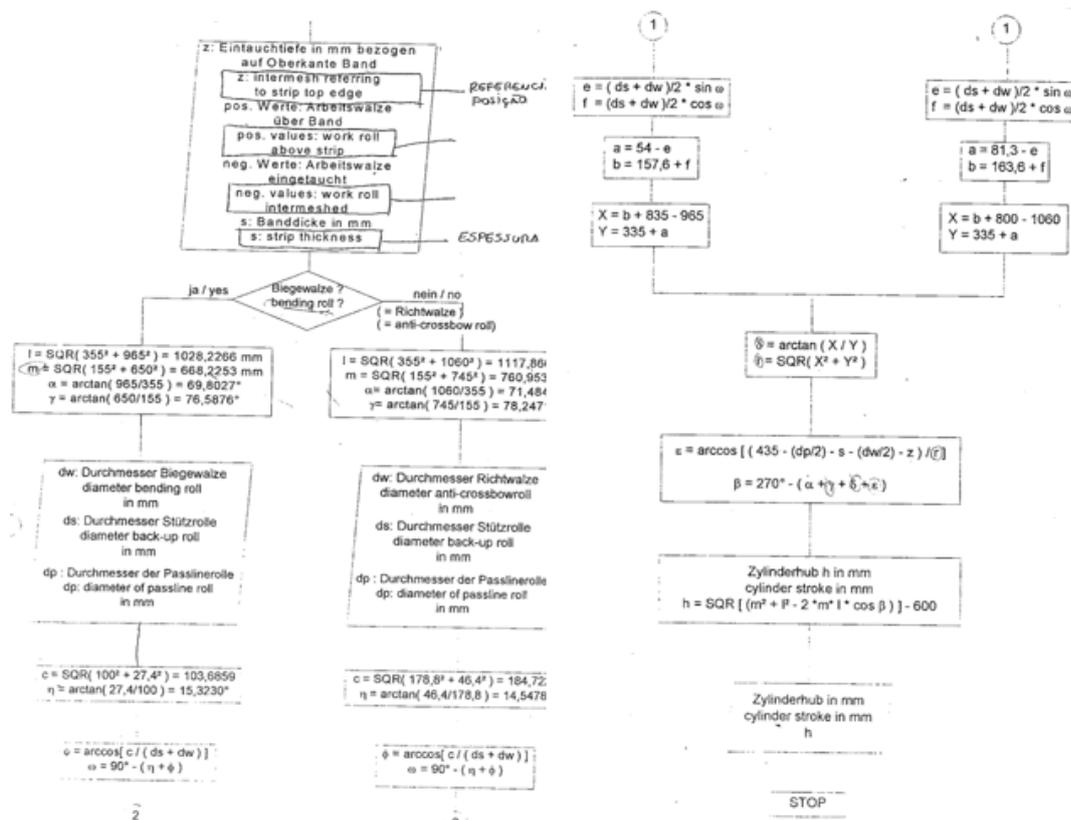


Figura 2. Algoritmo original de posicionamento dos cassetes.<sup>(1)</sup>

Para o controle de posicionamento é utilizado um bloco de programa implementado em PLC, o qual recebe a referência e o retorno de posição e desenvolve a linearização destes baseado no algoritmo citado. A malha de controle recebe estes sinais de referência e retorno e havendo uma diferença entre o valor objetivado e a posição real, é enviado um sinal de corrente para a servoválvula do cilindro hidráulico do respectivo conjunto de cassetes, provocando um deslocamento até que a posição objetivada seja atingida. Atingida a posição, a servoválvula não é mais acionada e o programa mantém a mesma posição até a passagem de uma solda (nova bobina).

## 2.3 Descrição do Problema

Em função da complexidade do algoritmo de correção da referência e do retorno da posição, a malha de posição sempre apresentou erros elevados entre a referência de posição (*setpoint*) e a posição real indicada ao operador através do sistema scada. Mesmo com manutenções periódicas, os altos esforços mecânicos a que o sistema é submetido durante o processo e o grande número de articulações existentes (rótulas e buchas) comprometem a precisão do sistema de posicionamento. Além dos desvios por cassete entre referência e indicação demonstrados pela figura 3, existe uma incógnita: a posição real.

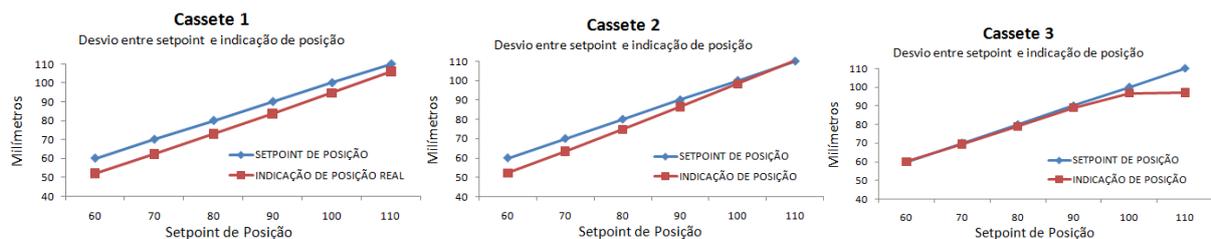


Figura 3. Desvio entre referência e indicação de posição.

## 2.4 Modelagem – Interpolação e Aproximação de Funções

Os métodos numéricos buscam soluções aproximadas para as formulações matemáticas. Nos problemas reais, os dados são medidas e, como tais, não são exatos. Uma medida física não é um número, é um intervalo, pela própria imprecisão das medidas. Daí trabalha-se sempre com a figura do erro, inerente à própria medição. Assim, os métodos numéricos buscam uma aproximação do que seria o valor exato. Dessa forma é inerente aos métodos se trabalhar com a figura da aproximação, do erro e do desvio.

A utilização de simuladores numéricos para determinação da solução de um problema real requer a execução da seguinte sequência de etapas:

1. Definir o problema real a ser resolvido;
2. Observar fenômenos, levantar efeitos dominantes e fazer referência a conhecimentos prévios físicos e matemáticos;
3. Criar modelo matemático;
4. Resolver o problema matemático.

## 2.5 Interpolação Polinomial

A interpolação polinomial é uma das idéias mais antigas da análise numérica, e ainda uma das mais usadas. É bastante fácil entender por que razão isso acontece.

Os polinômios são facilmente computáveis, suas derivadas e integrais são novamente polinômios e suas raízes podem ser encontradas com relativa facilidade. A simplicidade dos polinômios permite que a aproximação polinomial seja obtida de vários modos, entre os quais podemos citar os mais usados: Interpolação e Método dos Mínimos Quadrados. Portanto é vantajoso substituir uma função complicada por um polinômio que a represente. Além disso, o Teorema de Weirstrass [2] afirma que toda função contínua pode ser arbitrariamente aproximada por um polinômio. Métodos de interpolação polinomial são usados como uma aproximação para uma função  $f(x)$ , principalmente, nas seguintes situações:

- Não é conhecida a expressão analítica de  $f(x)$ , isto é, sabe-se apenas seu valor em alguns pontos  $x_0, x_1, x_2, \dots$  (esta situação ocorre muito frequentemente na prática, quando se trabalha com dados experimentais) e necessita-se manipular  $f(x)$  como, por exemplo, calcular seu valor num ponto ou sua integral num determinado intervalo.
- Quando  $f(x)$  é extremamente complicada e de difícil manejo.

O problema geral da interpolação por meio de polinômios consiste em dados  $n+1$  números (ou pontos) distintos (reais ou complexos)  $x_0, x_1, \dots, x_n$  e  $n+1$  números (reais ou complexos)  $y_0, y_1, \dots, y_n$  números estes que, em geral, são  $n+1$  valores de uma função  $y = f(x)$  em  $x_0, x_1, \dots, x_n$  determinar-se um polinômio  $P_n(x)$  de grau no máximo  $n$  tal que:

$$P_n(x_0) = y_0; P_n(x_1) = y_1; P_n(x_n) = y_n$$

Portanto tal polinômio existe e é único, passando necessariamente pelos pontos  $x_0, x_1, \dots, x_n$ , na hipótese de que estes sejam distintos. Há ainda a interpolação inversa, que consiste em: dado  $y'$  encontrar um  $x'$  tal que  $f(x') = y'$ , lembrando-se que  $y'$  e  $x'$  são aproximações de  $y$  e  $x$ .<sup>(3)</sup>

A Figura 4 representa a interpolação dos dados abaixo a partir do polinômio interpolador de Lagrange:

Dados:  $x = [00 \ 50 \ 75 \ 100 \ 125]$  e  $y = [0.5 \ 0.5 \ 0.4 \ 0.28 \ 0.23]$

Polinômio interpolador:

$$P(x) = 0,46933 \times 10^{-8} x^4 - 0,68266592 \times 10^{-6} x^3 - 0,237333387 \times 10^{-4} x^2 + 0,23066679 \times 10^{-2} + 0,5$$

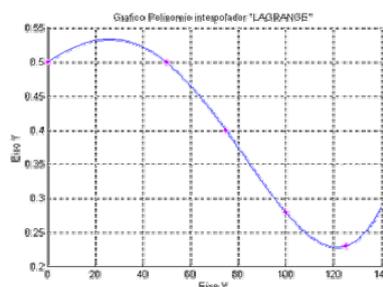


Figura 4. Exemplo de polinômio interpolador de Lagrange.<sup>(4)</sup>

## 2.6 Dificuldades Encontradas na Interpolação Polinomial

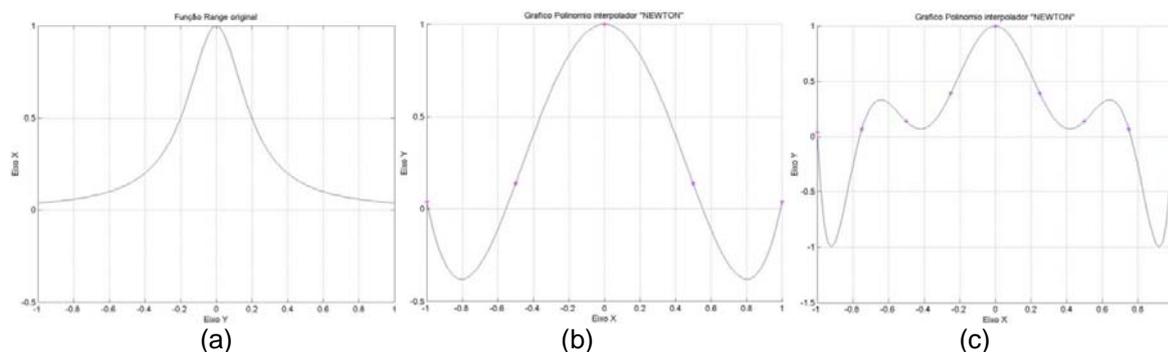
Se usados polinômios de alta ordem para interpolar um número grande de pontos de curvas ou dados planos, especialmente quando a curva muda de forma significativamente em cima do intervalo, enquanto é plana em algumas regiões e não plana em outras, ocorrem oscilações significativas que não representam o processo real.

Curva aproximadamente linear com abscissas diferentemente espaçadas é outro exemplo de dados para os quais interpolação polinomial não é bem sucedida.<sup>(4)</sup> Uma linha reta com valores de  $y$  e  $x$  desigualmente espaçados produz *overshoot* que não representa o sistema.

Outro exemplo famoso da interpolação polinomial que não produz uma aproximação boa é a função de Runge,<sup>(4)</sup> representada pela equação (1) e Figura 5A.

$$f(x) = \frac{1}{1 + 25x^2} \quad (1)$$

O uso de mais valores uniformemente espaçados piora a situação. A Figura 5B apresenta a interpolação da função Runge usando 5 pontos igualmente espaçados no intervalo de  $[-1, 1]$ . A Figura 5C apresenta a interpolação usando 9 pontos, também igualmente espaçados no mesmo intervalo. Verifica-se que *overshoot* é muito maior quando se usa mais pontos para interpolação.



**Figura 5.** (a) Função Runge original; (b) Interpolação da função Runge com 5 pontos; (c) Interpolação da função Runge com 9 pontos.

## 2.7 Aproximação das Funções

A idéia da aproximação de funções, também conhecida como ajuste de curvas, é a mesma da interpolação polinomial, exceto pelo fato de que no ajuste de curvas a função aproximadora não passa necessariamente em todos os pontos. A aproximação de funções é normalmente usada em dados reais de processos onde a medição pode apresentar algum erro ou incerteza e já exista um conhecimento a priori da função que melhor se ajusta aos dados.

Normalmente os métodos de aproximação mais usados são a aproximação linear, representada por uma equação de reta do tipo  $y = ax + b$ , a quadrática, representada por um polinômio de 2º grau tipo  $y = ax^2 + bx + c$  e a cúbica, representada por um polinômio de 3º grau tipo  $y = ax^3 + bx^2 + cx + d$ . A função de aproximação a ser escolhida é aquela que melhor se ajusta aos dados.

## 3 RESULTADOS

### 3.1 Modelagem do Sistema de Posicionamento de Cassetes

Uma vez identificado o problema, que historicamente era o erro de posicionamento real e de indicação de posição dos cassetes do quebrador de carepas, o próximo passo era caracterizá-lo e encontrar um método matemático e uma função que melhor se ajustasse ao sistema de posicionamento. Para isso foi feito um levantamento de dados reais do sistema para observar seus efeitos dominantes e fazer referência a conhecimentos prévios físicos e matemáticos para melhor entendê-lo. Os passos a seguir norteiam a análise do problema desde a coleta de dados até a obtenção de um modelo para o sistema.

### 3.2 Testes e Coleta de Dados

Analisando o funcionamento do sistema de posicionamento dos cassetes verificou-se que, como descrito anteriormente, existem sensores de posição (*temposonics*) instalados nos cilindros hidráulicos que fazem o deslocamento do conjunto. Desta forma surgiu a idéia de medir a penetração real dos cassetes usando topografia e correlacioná-la com o deslocamento real do cilindro hidráulico de deslocamento do mesmo. Além disso, foi verificado o *setpoint* e a indicação da posição real ao operador para melhor caracterizar o problema. As figuras seguintes mostram os dados levantados para os três cassetes do Quebrador de Carepas e os erros encontrados no posicionamento da malha original em relação ao posicionamento real encontrado através das medições topográficas. Valores negativos significam que o cassete encontra-se acima da chapa, posição 0 (zero) corresponde ao cassete tocando a tira (linha de passe) e valores positivos implicam em penetração efetiva, ou seja, deformação da tira, com todos os valores em milímetros.

A Figura 6 mostra as medições para o cassete 1: *setpoint* de posição, que durante os testes variou de -30 a 110, indicação da posição real, ou seja, retorno de posição calculado pela malha original e indicado no supervisor e posição topográfica, ou seja, a penetração real medida. Observa-se que existe erro em toda a faixa de posicionamento, mas com leve redução à medida que a penetração aumenta.

Na Figura 7 é mostrado o erro entre o valor solicitado pelo operador (*setpoint*) e a posição real (topografia), que reduz linearmente à medida que a penetração aumenta. Porém, o erro entre a posição real indicada no supervisor e a topografia atinge até 15,5 mm.

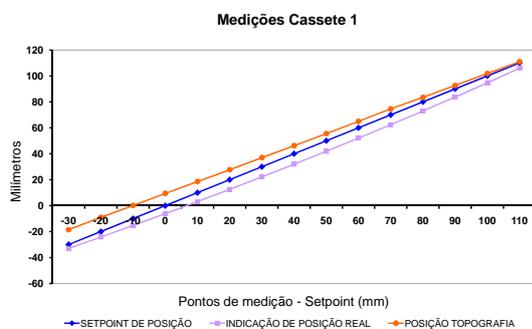


Figura 6. Medições do cassete 1.

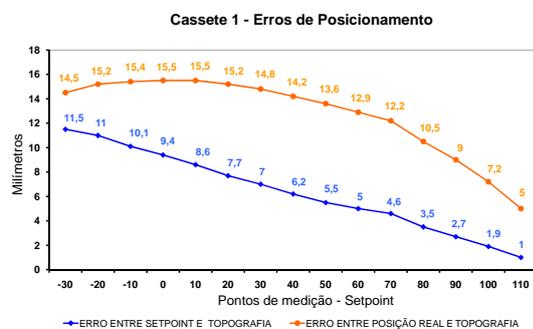


Figura 7. Erro de posicionamento do cassete 1.

A Figura 8 mostra as medições para o cassete 2. Observa-se que também existe erro em toda a faixa de posicionamento. Na Figura 9 é mostrado o erro entre o valor solicitado pelo operador (*setpoint*) e a posição real (topografia), que aumenta linearmente à medida que a penetração aumenta. Porém, o erro entre a posição real indicada no supervisório e a topografia atinge até 13,5 mm.

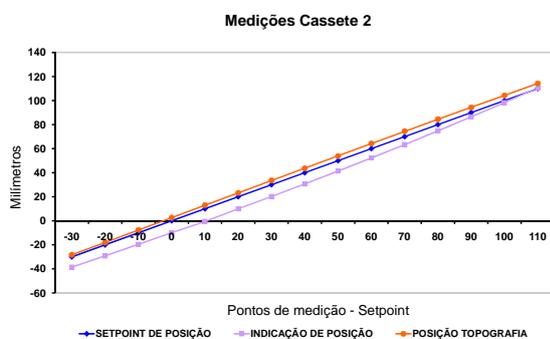


Figura 8. Medições do cassete 2.

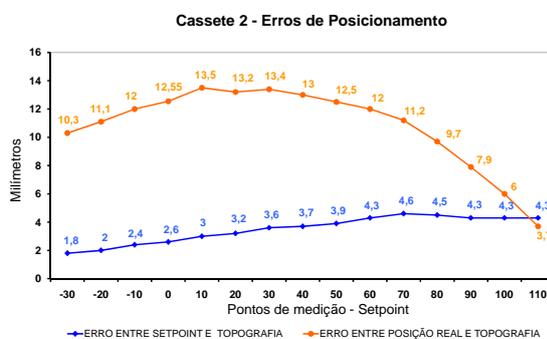


Figura 9. Erro de posicionamento do cassete 2.

A Figura 10 mostra as medições para o cassete 3. Observa-se também erro em toda a faixa de posicionamento. Na Figura 11 o erro entre o valor solicitado pelo operador (*setpoint*) e a posição real (topografia), se mantém praticamente constante em toda a faixa. Porém, o erro entre a posição real indicada no supervisório e a topografia aumenta consideravelmente à medida que a penetração aumenta, atingindo até 13,5 mm. No caso do cassete 3 as duas figuras demonstram que da posição 100 à posição 110 não houve penetração: o sistema atingiu limite mecânico.

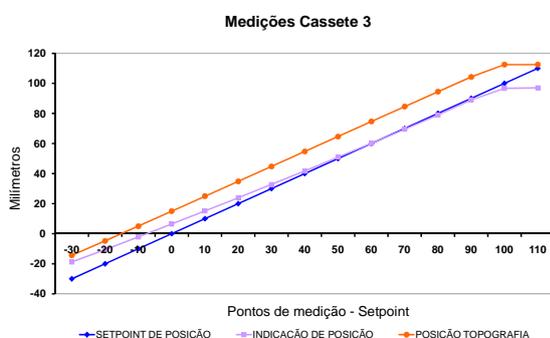


Figura 10. — Medições do cassete 3

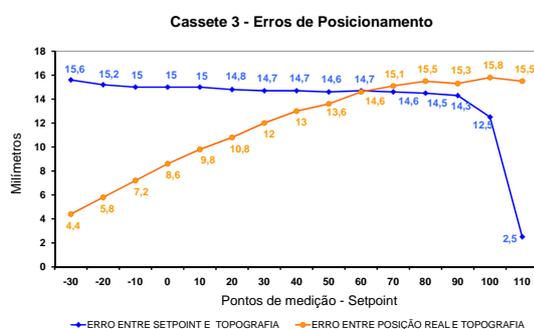


Figura 11. — Erro de posicionamento do cassete 3

Comparando os erros apresentados com os limites operacionais e do manual de operação e manutenção,<sup>(1)</sup> todos os cassetes apresentavam valores muito acima do especificado. No Manual de Operação e Manutenção do Quebrador de Carepas<sup>(1)</sup> limite máximo de variação é de 2 mm para que o Quebrador de Carepas desenvolva sua função, garantindo quebra de carepas e planicidade do material.

### 3.3 Análise Dos Dados

Os dados levantados pela medição topográfica da penetração real dos cassetes possibilitaram efetuar a correlação destes com o deslocamento do cilindro hidráulico. A Figura 12 apresenta os gráficos destas duas variáveis para os três cassetes.

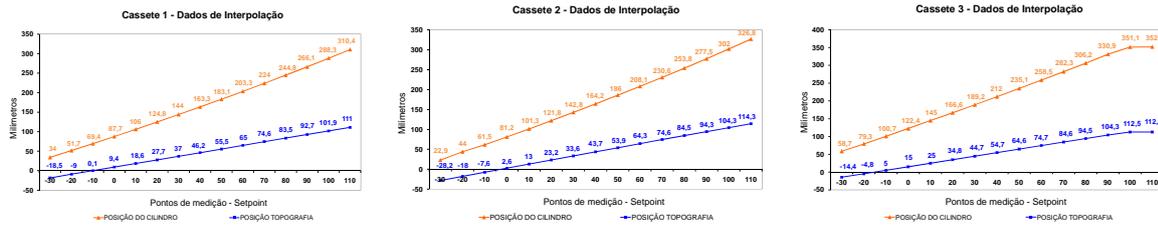


Figura 12. Dados para interpolação dos cassetes.

Observa-se que os dados são similares para os três cassetes. Existe uma pequena curvatura e no cassete 3, como supracitado, o sistema tocou o limite mecânico após 100 mm de penetração. Baseando-se nos dados e nos principais problemas relacionados à interpolação polinomial foram feitas as seguintes observações:

- muitos pontos geram polinômios de alta ordem, provocando oscilações significativas;
- interpolação necessariamente passa por todos os pontos e como são dados reais, pode ter ocorrido alguma incerteza nas medições;
- no caso de interpolação possíveis pontos fora da faixa dos dados provocam oscilações; E
- o sistema não é complexo, podendo ser ajustado por polinômio de baixo grau.

### 3.4 Escolha da Função Matemática e Modelagem

Considerando as observações supracitadas uma aproximação quadrática, representada por um polinômio do tipo  $y = ax^2 + b + c$  é a função ideal para modelar o sistema. Como é um ajuste de curvas, evitará pequenos erros de medição e terá o grau ou a complexidade necessária para representar os dados.

De posse de dados confiáveis de posição real (topografia) e de posição do cilindro (*temposonics*) e da função matemática definida, partiu-se para definir a estratégia de modelagem. Como o operador entra com uma referência de penetração efetiva em mm e esta é convertida para a malha de posição como referência de posicionamento para os cilindros deslocarem e produzirem a penetração objetivada, uma relação causa e efeito entre estes dados deverá ser obtida. Uma aproximação direta deve ser feita:  $x$  como *setpoint* de posição e  $y$  como resultante para a malha de posicionamento.

Além disso, existe uma indicação de posição feita a partir da medição do deslocamento do cilindro. Neste caso deverá ser feita uma aproximação inversa:  $x$  passa ser o valor real de posição do cilindro e  $y$  o valor da penetração efetiva. Desta forma dois polinômios deverão ser obtidos por cassetes: um para posicionamentos e outro para indicação. Definida a função e a estratégia de modelagem foi elaborado um algoritmo para processamento iterativo em computador. Os polinômios de posicionamento e indicação de cada cassete obtidos a partir da aproximação direta e inversa são mostrados no Quadro 1.

O polinômio obtido por aproximação direta é usado para gerar a referência de posição para o deslocamento do cilindro a partir da referência de posição e o polinômio obtido por aproximação reversa é usado para indicar a posição real a partir da medição do deslocamento do cilindro hidráulico.

**Quadro 1.** Funções de aproximação dos dados dos cassetes

Cassete 1	Aproximação direta	$y = 2,131 \times 10^{-3} x^2 + 1,930261 x + 69,209061$
	Aproximação reversa	$y = -2,21 \times 10^{-4} x^2 + 0,544702 x - 36,70231$
Cassete 2	Aproximação direta	$y = 2,467 \times 10^{-3} x^2 + 1,9086 x + 75,63985$
	Aproximação reversa	$y = -2,57 \times 10^{-4} x^2 + 0,5559413 x - 41,025818$
Cassete 3	Aproximação direta	$y = 1,549 \times 10^{-3} x^2 + 2,17749 x + 89,733256$
	Aproximação reversa	$y = -1,29 \times 10^{-4} x^2 + 0,487092 x - 42,683431$

### 3.5 Nova Malha de Posição

Para garantia do posicionamento correto dos cassetes são aplicados os polinômios de referência de posição e os polinômios de posição real do cilindro hidráulico. Na nova malha de posição o algoritmo da figura 2 foi substituído por um polinômio que representa as principais características do sistema, reduzindo drasticamente a complexidade do controle de posição dos cassetes.

#### 3.5.1 Geração da referência de posição

A referência de posição é selecionada pelo operador a partir do supervisor de acordo com o material em processo. Um único valor de posição é gerado para os dois cilindros hidráulicos de um cassete. O retorno de posição é individual, sendo um para cada cilindro hidráulico. Para gerar a referência de posição correspondente ao posicionamento correto da haste do cilindro é necessário que o valor seja processado pelo polinômio de referência de posição. O valor gerado pelo polinômio recebe compensações de diâmetro e espessura da tira e em seguida é entregue ao controle de posição, onde é comparado com a posição atual do cilindro. As compensações permitem um posicionamento mais preciso do conjunto, mesmo ocorrendo desgaste e usinagem dos rolos ou mudança na espessura do material.

A redução da complexidade da malha de posição obtida com a implantação dos polinômios possibilitou individualizar a entrada de dados dos cassetes via supervisor e criar compensações específicas para cada cassete. Quando os dados dos cassetes não eram individualizados, era necessário que os rolos de mesmo diâmetro fossem montados em “família”, aumentando os custos com retífica. Mesmo assim, como não era possível obter cassetes com diâmetros idênticos, o operador considerava a média dos diâmetros e inseria em um único campo o diâmetro dos dois cassetes no supervisor.

#### 3.5.2 Indicação da posição real

Para gerar a indicação de posição correspondente à posição real do rolo cassete é necessário que o valor seja processado pelo polinômio de indicação.

## 4 DISCUSSÃO

Diversos ganhos foram obtidos com a implantação do projeto. Abaixo são comparados os objetivos com os resultados obtidos.

- **Simplificação da malha de posição:** o polinômio desenvolvido (Figura 13) substitui todo o algoritmo da malha original (Figura 14), com maior precisão;

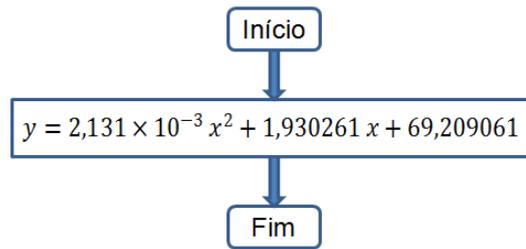


Figura 13. Polinômio desenvolvido.

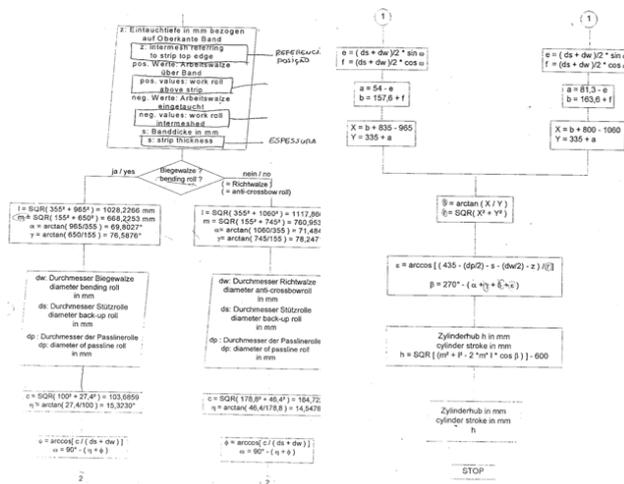


Figura 14. Malha original.

- Atendimento aos limites de desvios de posição da NTA e do manual de operação:** a Figura 15 mostra os desvios de posição para os cassetes 1, 2 e 3 respectivamente. Antes do projeto havia erros de posicionamento de até 15 mm. Após a modelagem do sistema e implementação dos polinômios no PLC o maior desvio foi de 1,09 mm no cassete 2 na posição - 20, que é fora da região de operação dos cassetes. Acima de 60 mm de penetração (região de operação) o máximo desvio foi 0,38 mm. Desvios positivos e negativos significam penetrações maiores e menores;

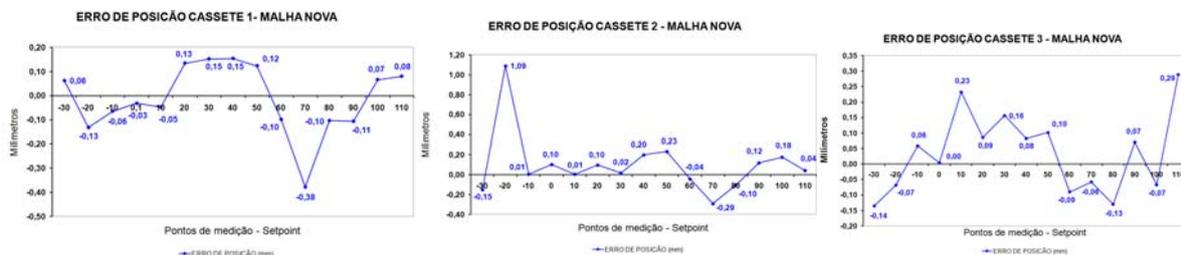


Figura 15. Dados Desvios de posição dos cassetes após implementação do polinômio.

- Redução de defeitos na superfície do material em processo:** o trabalho reduziu os defeitos “marcas de cassete” e “ondulação”, porém não foi possível apurar resultados após a implantação do projeto porque os defeitos citados possuem outras causas e, além disso, o banco de dados de defeitos não permite diferenciá-las;

- **Individualização da entrada de dados dos diâmetros dos cassetes:** A simplificação da malha permitiu a individualização da entrada dos diâmetros dos cassetes, eliminando assim a necessidade de família de cilindros, reduzindo consequentemente os custos com retíficas.

## 5 CONCLUSÃO

Os métodos matemáticos utilizados neste projeto podem ser aplicados em qualquer sistema dinâmico em que exista uma relação causa e efeito entre as variáveis. A técnica aplicada especificamente no posicionamento dos rolos cassetes do Quebrador de Carepas pode ser reaplicada na íntegra em equipamentos ou sistemas de posicionamentos similares em empresas do grupo Aperam.

A partir da análise de dados reais do processo, aplicação correta de técnicas de modelamento matemático, planejamento e rigor técnico tornou-se possível viabilizar a implantação de uma inovação tecnológica no equipamento, utilizando o sistema de automação existente e, portanto de baixo custo de implantação, apenas para medições topográficas. Apesar de não ter sido apurado ganhos de qualidade, a precisão obtida após implementação do modelo (polinômio) certamente tem contribuído para minimização de defeitos superficiais no material.

## Agradecimentos

Os autores agradecem à Aperam pela autorização da divulgação do trabalho e pelo apoio durante o seu desenvolvimento.

## REFERÊNCIAS

- 1 Manual de Operação e Manutenção do Quebrador de Carepas, SUNDWIG W. O., nº 8660, 1994.
- 2 RUGGIERO, M. A. G. & LOPES, V. L. R. *Cálculo Numérico: Aspectos Teóricos e Computacionais*. 2.ed. São Paulo, Makron, 1997.
- 3 HATTORI, M. T. H. & QUEIROZ, B. C. N. *Métodos e Software Numéricos*. Departamento de Sistemas e Computação, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 1995
- 4 FAUSETT, L. V. *Applied Numerical Analysis using Matlab*, Prentice-Hal, 1999