

DESENVOLVIMENTO DE UMA SISTEMÁTICA DE AUXÍLIO PARA SELEÇÃO DE SISTEMAS DE AJUSTAGEM PARA MÁQUINAS-FERRAMENTA DE ULTRA PRECISÃO

Cláudio J. Weber*, Fernando A. Forcellini*, Walter L. Weingaertner*, Günter Höhne**

* Universidade Federal de Santa Catarina - Departamento de Engenharia Mecânica - NeDIP Núcleo Integrado de Desenvolvimento de Produtos. Campus Universitário Trindade, Florianópolis, SC, Brasil, CEP 88040-900, Caixa Postal 476, e-mail: weber@nedip.ufsc.br

** TUI - Technische Universität Ilmenau, Institut für Maschinenelemente und Konstruktion, Ilmenau, Deutschland, e-mail: guenter.hoehne@maschinenbau.tu-ilmenau.de

Resumo

Este artigo aborda o tema da ajustagem, sua definição, importância, limitações, aplicação, formas e tipos, assim como ajustagem no desenvolvimento de produtos genéricos como uma técnica de obtenção de elevada precisão funcional, sem no entanto usar elevadas precisões construtivas. A seguir o artigo foca o projeto de sistemas de ajustagem de máquinas-ferramenta de ultraprecisão, sistematizando as atividades de ajustagem nas etapas de projeto. Considera-se que a ajustagem deve ser levada em conta desde as fases iniciais do projeto, sendo que, os sistemas de ajuste tem influência significativa na escolha dos princípios de solução, e de medidas de grande efetividade na redução de erros, como definições de tolerâncias.

Palavras-chave: Ajustagem, Ultraprecisão, Nanotecnologia

1. Introdução

A ajustagem é definida por [Hansen, 1970] como sendo uma técnica que utiliza o movimento de componentes funcionais durante, ou depois da montagem em uma direção funcional, de maneira tal que após seu reposicionamento as funções de todo o sistema técnico possam ser realizadas. A quantidade de movimento utilizada é para a correção da posição de um componente e, em geral, somente algumas partes que tem um efeito específico na função total deverão ser movidas, não sendo necessário que todo componente funcional esteja em sua posição teoricamente correta.

O objetivo deste artigo é de prover conhecimento básico sobre ajustagem, e sistematizar estes conhecimentos nas etapas de projeto focando seu uso em máquinas-ferramentas de ultra precisão.

Neste artigo serão abordados somente os dispositivos mecânicos de ajustagem. Não serão abordados os sistemas computacionais de compensação de erros.

2. Importância da ajustagem

Segundo [McKeown, 1997] cada vez mais cresce a demanda por produtos de tecnologia avançada, que são totalmente dependentes de processos de fabricação de alta/ultraprecisão. Isto torna necessário o desenvolvimento de máquinas de alta precisão e seus respectivos sistemas e controles, capazes de atenderem esta demanda. Cabe mencionar que, atualmente a diminuição do tamanho dos lotes e, a diversificação cada vez maior dos produtos, exige

máquinas-ferramentas flexíveis capazes de se ajustarem de maneira rápida e econômica a este novo cenário produtivo.

As exigências de desempenho em termos de precisão de máquinas e sistemas de medição de alta/ultraprecisão tem aumentado de forma contínua, tanto em termos de tolerâncias geométricas e dimensionais, bem como a qualidade superficial. Contudo estas exigências não podem ser reduzidas continuamente por motivos não somente tecnológicos, mas também físicos, torna-se então necessário o desenvolvimento e uso de técnicas e meios que possam compensar tais deficiências. Em vista disto há a necessidade de uma sistemática que auxilie a equipe de projetos na seleção e aplicação das técnicas e na estratégia de ajustagem. Dentro deste contexto, as técnicas de ajustagem desempenham um papel fundamental na manufatura de alta precisão, ou seja, é possível produzir máquinas com elevada precisão funcional, e componentes de ultraprecisão sem no entanto fazer-se uso de construções com a mesma magnitude de precisão. Desta forma pode-se enumerar os seguintes fatores como de fundamental importância da ajustagem:

- Otimização funcional das máquinas-ferramenta;
- Redução dos custos de fabricação e operacionais;
- Otimização da manutenção;
- Compensação de desgastes;
- Melhora da montabilidade;
- Eliminação e/ou compensação os erros causados pela manufatura e montagem;
- Obtenção de futuros avanços em ciência e tecnologia.

3. Limitações da ajustagem

Quando menos precisas forem as dimensões de fabricação, mais barato será a fabricação da máquina-ferramenta, porém; mais sofisticados devem ser os sistemas de ajuste, tornando-os mais caros. Dessa forma, um dos limites impostos aos sistemas de ajustagem é a definição correta dos campos de tolerância na fabricação, de modo que seus custos não inviabilizem os sistemas de ajustagem.

Os sistemas de ajuste não podem ter muitas posições de ajuste, pois isto tornaria a tarefa de ajustagem muito complexa. Pelo fato de serem componentes mecânicos, também estão sujeitos a erros, portanto devem ser selecionados, dimensionados e localizados através de bons critérios de projeto, caso contrario terão pouca efetividade, ou até mesmo, podem prejudicar a precisão funcional.

4. Aplicação de ajustagem

A ajustagem pode ser aplicada com grande êxito em quase todas as etapas do ciclo de vida de um produto, e para os mais variados propósitos, que vão de máquinas de ultraprecisão até maquinaria pesada. A aplicação das técnicas de ajustagem deve ser adequadamente considerada desde as fases iniciais do projeto. A seguir serão mostradas algumas situações típicas onde podem ser aplicados os sistemas de ajustagem.

- Quando as características necessárias de um componente funcional, não podem ser realizadas, dentro das tolerâncias industriais disponíveis;
- Em casos onde o movimento de um componente durante ou depois da montagem possa ser feito de maneira mais fácil, segura e barata em relação ao uso de métodos de produção de precisão;
- Em uma estrutura comum para várias montagens funcionais quando é feita depois da conclusão das montagens separadas, ou é feita em outro lugar;

- Se as imprecisões na estrutura principal são desconhecidas ao fabricante das sub montagens;
- Quando folgas aparecem durante a montagem, devido a imprecisão na fabricação dos componentes individuais;
- Componentes funcionais submetidos a uso intenso, que apresentem desgastes;
- Mecanismos que precisam ajustar-se constantemente a diferentes condições de uso e solicitações de trabalho;
- Eliminação de etapas do processo produtivo, bem como de máquinas caras e precisas das linhas de produção.

5. Classificação dos sistemas de ajustagem

Os sistemas de ajustagem são classificados quanto ao seu tipo como:

- Puramente mecânicos,
- Eletromecânicos,

Os sistemas de ajustagem classifica-se quanto a sua atuação em:

- Manuais
- Automáticos

Os sistemas de ajustagem classifica-se quanto a sua dinâmica em:

- Sistemas estáticos: estes requerem a ação de um agente externo para que o processo de ajustagem possa ser executado, não pode ser feito durante o trabalho de uma máquina-ferramenta. Estes sistemas não implementam a flexibilidade operacional.
- Sistemas dinâmicos: estes podem executar o processo de ajustagem antes ou durante o trabalho de uma máquina-ferramenta. Estes sistemas implementam a precisão e a flexibilidade operacional.

Os sistemas de ajustagem podem ser combinados de várias maneiras em um mesmo produto. Estes sistemas são caracterizados pelo fato de agregarem dois ou mais sistemas de ajustagem, esta combinação pode ser em série, paralelo, ou uma combinação de ambas. Esta combinação pode ser feita também entre os sistemas puramente mecânicos e eletromecânicos, manuais e automáticos, além dos sistemas estáticos e dinâmicos. No mesma máquina-ferramenta, também podem ser combinados vários sistemas de ajustagem com diferentes princípios de solução.

6. Ajustagem no desenvolvimento de um produto

Os produtos devem cumprir com sua função com precisão, qualidade e confiabilidade, a um custo acessível, assim tolerâncias adequadas, e ajustes garantem tais requisitos assegurando que os erros fiquem dentro de limites admissíveis, para tanto o comportamento de erro deve ser considerado desde as fases iniciais do processo de desenvolvimento do produto. Isto fornece subsídios para decidir por medidas de redução de erros através de ajustes, ou através de outros meios.

Os primeiros trabalhos sobre ajustagem foram estudos genéricos, e foram apresentados por [Hansen, 1970], [Bauerschmidt, 1975], [Herrig1989] e [Schilling, 1993], este último apresentou um fluxograma com a seqüência das ações e ferramentas para análise de erros e ajustagem em produtos. O fluxograma apresentado na figura 1, é baseado na proposta de [Schilling, 1993], porém difere desta ao considerar a possibilidade de que um produto pode incorporar simultaneamente sistemas de ajustagem manuais e automáticos. Outra diferença é a inclusão de um processo de decisão na fase de análise, após a redução de erros. Caso os erros sejam de uma magnitude tal, que não possam ser controlados por medidas tecnológicas

e/ou por ajustagem, deve-se proceder alterações mais profundas como, alterações construtivas e/ou adoção de um novo princípio técnico.

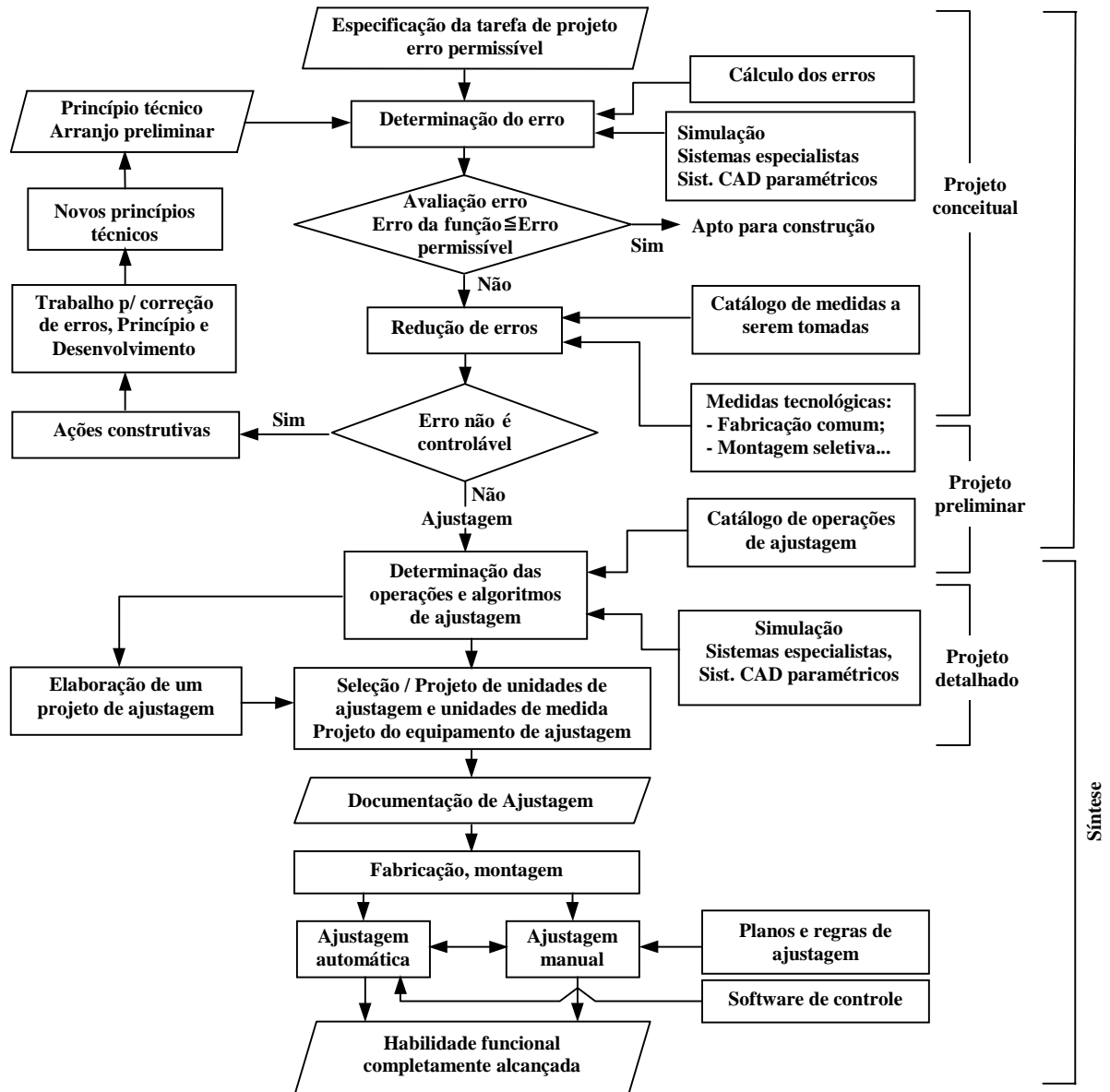


Figura 1. Fluxograma de informações para análise de erros e ajustagem.

7. Ajustagem em máquinas-ferramentas de ultraprecisão

As imprecisões dos componentes de uma máquina-ferramenta de ultraprecisão por exemplo, planicidade e/ou retinidade das guias tenderão a se reproduzir também nas peças usinadas. No entanto os erros das guias e/ou outros componentes podem ser compensados através de sistemas de ajustagem, de forma que a máquina-ferramenta atenda os requisitos funcionais de precisão, exigidos pelos produtos.

A demanda por produtos cada vez mais precisos e baratos fez com que os fabricantes de máquina-ferramenta de ultraprecisão, tenham como principal objetivo a implementação da precisão e redução de custos em suas máquinas. Assim os sistemas de ajustagem vem de encontro a este objetivo como uma ferramenta para satisfazer tais necessidades. Além disto, a ajustagem tem se tornado muito importante na montagem de máquinas-ferramentas de

ultraprecisão, pois além de permitir diminuição dos erros causados pela montagem, quando os erros das peças vão se somando, permite também a otimização deste processo pois trabalha-se com tolerâncias menos estreitas.

Na manutenção e instalação de máquinas, sempre que se trocam peças, adiciona se ou retira se módulos, é necessário a ajustagem das máquinas para que as mesmas possam cumprir as funções para as quais foram projetadas. Além do que, com o uso, as máquinas vão se desgastando, assim sendo os sistemas de ajustagem podem compensar tais deficiências, sem que seja necessário a troca de componentes, baixando os custos operacionais.

Cabe mencionar que a ajustagem é imprescindível na maioria dos processos industriais, pois é necessário que as máquinas-ferramentas sejam flexíveis para que possam ajustar-se a diferentes condições de usinagem, considerando a grande diversificação dos produtos a serem produzidos.

8. Sistemática de auxílio para seleção de sistemas de ajustagem para máquinas-ferramenta de ultraprecisão

Os sistemas de ajustagem devem começar a ser considerados desde a fase de projeto conceitual de uma máquina-ferramenta de ultraprecisão, simultaneamente com os princípios de solução, de forma a prover-lhes precisão e implementar habilidade funcional. A tabela 1 mostra as atividades de projeto de máquinas-ferramenta de ultraprecisão e seus sistemas de ajustagem sistematizadas nas várias etapas de projeto.

O processo de ajustagem se inicia após terem sido esgotadas todas as possibilidades de redução de erros, e de uma criteriosa avaliação de sua viabilidade, principalmente do ponto de vista técnico e econômico. Nesta etapa do processo de projeto é necessário o conhecimento detalhado da natureza, magnitude e localização dos erros que afetam o desempenho da função. Além disto é necessário saber onde, como e com que meios a ajustagem será realizada.

Tabela 1. Sistematização das atividades de projeto.

Esclarecer a tarefa	Projeto conceitual	Projeto preliminar	Projeto detalhado
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Definição da tarefa ▪ Elaborar especificações ▪ Definição dos erros permissíveis 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Estabelecer estrutura de funções ▪ Cálculo dos erros para funções ▪ Pesquisar princípios de solução ▪ Combinação de variantes de solução ▪ Selecionar componentes segundo critérios técnicos e econômicos ▪ Investigação dos erros ▪ Avaliação dos erros a cada nível de princípios de solução ▪ Instruções de redução de erro por meio de ajustes, manufatura esp., definição da tolerância ▪ Pesquisa de princípios de solução para sistemas de ajuste 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Desenvolver e otimizar o projeto preliminar ▪ Refinar e avaliar sobre critérios técnicos e econômicos ▪ Otimizar e completar projeto formas ▪ Verificar erros, controlar custos ▪ Preparar a lista das partes preliminares e documentos de produção ▪ Determinação dos algoritmos e operações de ajustagem ▪ Seleção do melhor sistema de ajuste 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Finalizar detalhes ▪ Completar desenhos detalhados e documento de produção ▪ Projeto do sistema de ajustagem ▪ Documentação do sistema de ajustagem: planos, instruções, software ▪ Verificar todos os documentos

9. Modelamento da ajustagem

Os fundamentos da ajustagem podem ser explicados segundo [Schilling, 1993], com a ajuda de um circuito de ajustagem, figura 2. A similaridade com circuitos de controle pode ser

observada. Assim como engenharia de controle, ela permite o modelamento das situações de ajustagem, e da representação matemática com sistemas especiais.

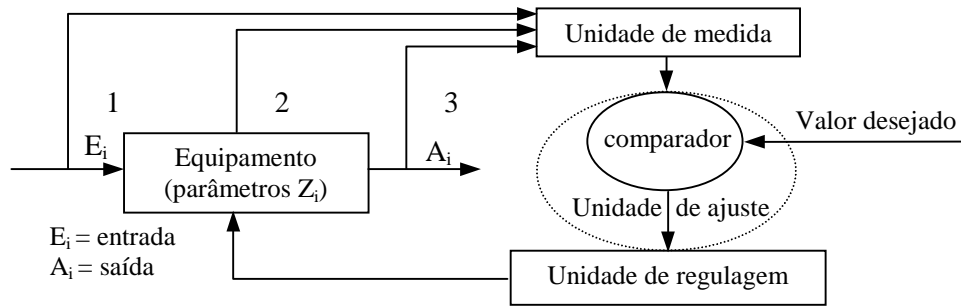


Figura 2. Circuito de ajustagem

Em função da grande importância da modelagem no processo de ajustagem, esta fase será e detalhada através de um exemplo da modelagem de um mecanismo de 4 barras, para que haja uma melhor compreensão, figura 3.

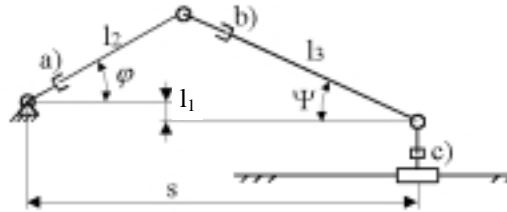


Figura 3. Representação de um mecanismo de 4 barras.

Como os comprimentos das barras tem limitada precisão, assim a função desejada que é o posicionamento na dimensão s , possuirá um erro $\Delta s = f(\Delta l_1, \Delta l_2, \Delta l_3, \Delta \varphi)$, que deve ser corrigido por ajustagem. Para a modelagem do mecanismo é necessário a obtenção da função de transferência expressa pela equação (1).

$$s(\varphi) = l_2 \cos \varphi + \sqrt{l_3^2 - (l_1 + l_2 \sin \varphi)^2} \quad (1)$$

Para que possa ser obtida precisão funcional em s , é necessário achar as grandezas de correção para as dimensões l_1 , l_2 e l_3 , de forma que estas dimensões possam ser ajustadas. Assim a equação de erro (2) é obtida derivado-se as equações que descrevem o mecanismo. Com a ajuda desta equação um modelo matemático para o problema da ajustagem pode ser obtido.

$$\Delta s = \cos(\varphi + \Psi) / \cos(\Psi) \cdot \Delta l_2 + \sin(\Psi) / \cos(\Psi) \cdot \Delta l_1 + 1/\cos(\Psi) \cdot \Delta l_3 \quad (2)$$

Em função de haver três desvios nas dimensões (Δl_1 , Δl_2 , Δl_3), são necessárias três equações lineares independentes para três diferentes ângulos de acionamento φ_1 , φ_2 , φ_3 ; e que a dimensão s seja função destes ângulos, de maneira a possibilitar o cálculo dos erros. Por comparação com o curso ideal s , podem ser determinados três desvios (Δl_1 , Δl_2 , Δl_3), figura 4.

O efeito dos erros nas dimensões l_1 , l_2 e l_3 na dimensão s , pode ser descrito com a equação de erro linear $\Delta y = \epsilon_{ij} \cdot \Delta x$. Neste caso resultam três valores de influência ϵ_{ij} para cada ângulo de acionamento φ , e que estão acoplados a cada uma das dimensões l_1 , l_2 , e l_3 , de onde resultam três equações lineares, (3), para cada ângulo de acionamento, de maneira que possam ser calculados os valores de correção para cada dimensão l_1 , l_2 , e l_3 .

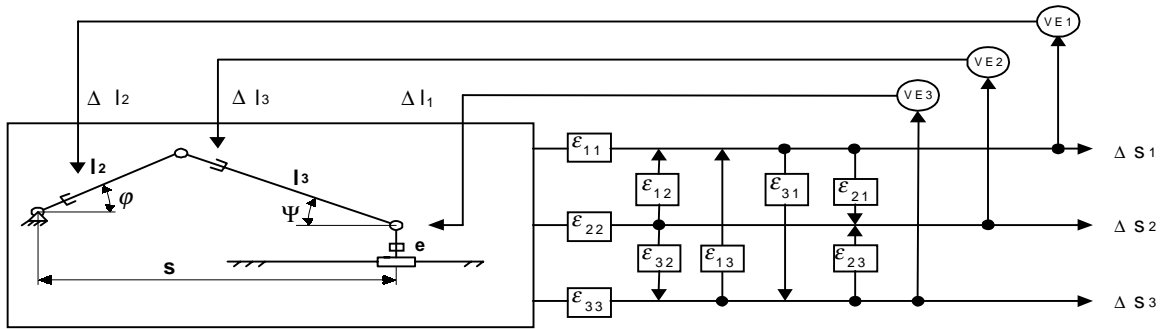


Figura 4. Conjunto de dimensões de ajustagem, VE – unidade de comparação.

$$\Delta y = \epsilon_{ij} \cdot \Delta x$$

$$\begin{aligned} \Delta S_1 &= \epsilon_{11}(\varphi_1) \cdot \Delta l_2 + \epsilon_{12}(\varphi_1) \cdot \Delta l_3 + \epsilon_{13}(\varphi_1) \cdot \Delta l_1 \\ \Delta S_2 &= \epsilon_{21}(\varphi_2) \cdot \Delta l_2 + \epsilon_{22}(\varphi_2) \cdot \Delta l_3 + \epsilon_{23}(\varphi_2) \cdot \Delta l_1 \\ \Delta S_3 &= \epsilon_{31}(\varphi_3) \cdot \Delta l_2 + \epsilon_{32}(\varphi_3) \cdot \Delta l_3 + \epsilon_{33}(\varphi_3) \cdot \Delta l_1 \end{aligned} \quad (3)$$

Foi desenvolvido na TUI um programa para simular e otimizar o processo de ajustagem chamado ILJUR, que é apresentado nas figuras 5 e 6 simulando o mecanismo de quatro barras do exemplo anterior. Para a simulação é necessário as dimensões de l_1 , l_2 , e l_3 ; as posições nas quais se deseja ajustar, isto é, os ângulos onde é necessária a precisão funcional φ_1 , φ_2 , φ_3 ; as metas de precisão, bem como os valores máximos para os erros de fabricação e montagem. Substituindo o valor das dimensões e os ângulos da posições a serem ajustadas em cada membro da equação de erros, podem ser achados os valores dos termos da matriz de influência usados na tela de entrada de dados do programa, figura 5.

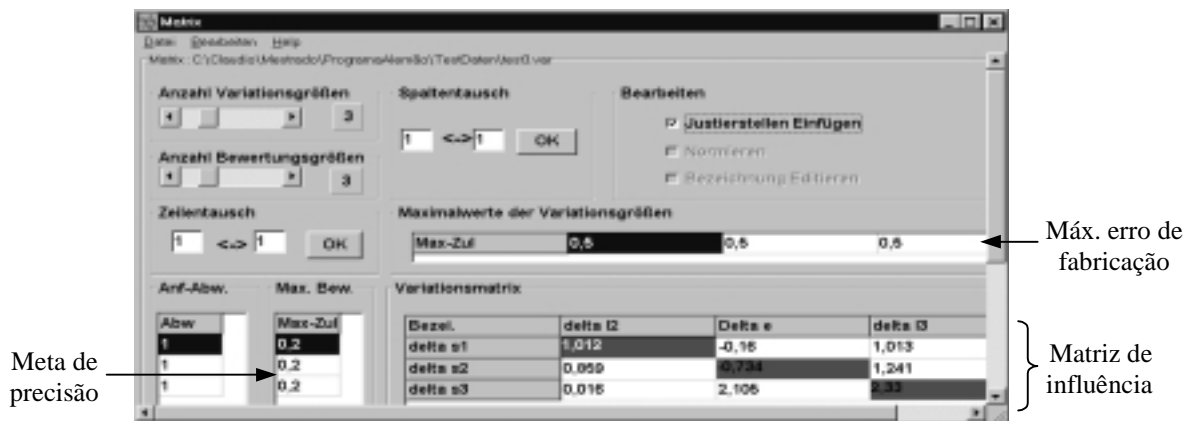


Figura 5. Tela de entrada de dados do programa ILJUR 2.0. Fonte: ILJUR, 96

Com os dados do problema inseridos no programa ILJUR é possível fazer as simulações mostradas, figura 6, e obter as seguintes informações:

- Prever que posições do ângulo φ acarretam uma parcela maior de erros;
- Obter os valores de correção para as posições a serem ajustadas;
- Obtenção dos valores de erros residuais, em função dos valores de correção;
- Prever qual parte (barra) do mecanismo contribui com uma parcela maior de erros;
- Qual a sensibilidade e o curso máximo para cada solução de ajustagem;
- Definir uma seqüência de ajustagem, isto pode ser observado nas células em vermelho da matriz de influência, figura 5.

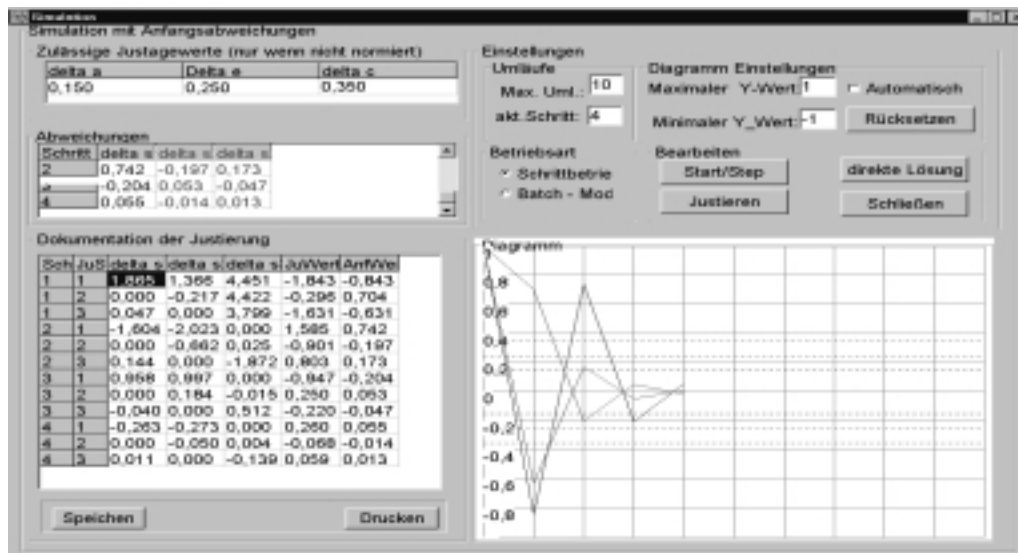


Figura 6. Tela de simulação do programa ILJUR 2.0. Fonte: ILJUR, 96

10. Conclusões

Em função da grande demanda por elevada precisão funcional, e de custos competitivos, a ajustagem é de importância fundamental. Também é necessário que a equipe de projetos, tenha conhecimento de técnicas adequadas para a correta seleção e aplicação dos mecanismos de ajustagem, desde as fases iniciais de projeto; permitindo assim otimizar a precisão e o desempenho funcional dos equipamentos.

A ajustagem tem se revelado uma técnica muito versátil na engenharia, pois pode ser aplicada praticamente em todas as áreas, desde máquinas de ultra precisão, até mecânica pesada. Além do que, otimiza a precisão funcional de uma máquina sem no entanto que a mesma tenha elevada precisão construtiva. Ao longo do ciclo de vida, a ajustagem desempenha um papel importante, otimizando e tornando as máquinas aptas a desempenharem as funções para as quais foram projetadas, desde as fases de montagem, instalação, manutenção, e preparação da máquina.

11. Bibliografia

- BAUERSCHMIDT, M., 1975., **Beitrag zur Verbesserung des Fehlerverhaltens von Geräten**. Ph.D. Thesis, TU Ilmenau.
- HANSEN, F., 1970., **Adjustment of Precision Mechanisms**. London Iliffe Books LTD.
- HERRIG, M., 1989., **Analyse von Justiervorgängen in Optischen Geräten mit einem linearen Fehlermodell**. Proceedings 34th IWK, TH Ilmenau, p 203-205.
- ILJUR. 2.0, **Programm zur Simulation von Tolerierungs und Justieraufgaben sowie der Diagnose vorgenommener Justierungen na konkreten Geräten**. TUI Technische Universität Ilmenau, 1996.
- McKEOWN, P., 1997., **Precision engineering & nanotechnology**. Lecture Notes.
- SCHILLING, M., NÖNING, R., 1993., **Justierung in der Feinwerktechnik**. Proceedings 38th IWK, TU Ilmenau Germany, p 33-44.