

UNIVERSIDADE SANTA CECÍLIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

EDUARDO TRAMONTINA

**EVOLUÇÃO TECNOLÓGICA DOS PROCESSOS DE CONTROLE DIMENSIONAL
DE BIELAS NA INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA**

SANTOS/SP

2017

EDUARDO TRAMONTINA

**EVOLUÇÃO TECNOLÓGICA DOS PROCESSOS DE CONTROLE DIMENSIONAL
DE BIELASNA INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA**

Dissertação apresentada à Universidade Santa Cecília como parte dos requisitos para obtenção de título de mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, sob orientação de: Prof. Dr. José Carlos Morilla.

SANTOS/SP

2017

Autorizo a reprodução parcial ou total, deste trabalho, por qualquer que seja o processo, exclusivamente para fins acadêmicos e científicos.

Tramontina, Eduardo.
Evolução tecnológica dos processos de controle dimensional
de bielas na indústria automobilística / Eduardo Tramontina.
--2017.
71 f.

Orientador: Prof. Dr. José Carlos Morilla.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Santa Cecília,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Santos,
SP, 2017.

1. Controle dimensional. 2. Biela automotiva. 3. Motor
automotivo. I. Morilla, José Carlos. III. Título.

Dedico este trabalho à minha esposa, com amor, admiração e gratidão por sua compreensão, carinho, e incansável apoio ao longo de toda a minha formação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo maravilhoso dom de viver com saúde, força, coragem e vontade de vencer todos os obstáculos que se postaram em meu caminho.

Ao meu orientador, Prof. Dr. José Carlos Morilla, um agradecimento carinhoso por todos os momentos de paciência, compreensão e competência.

Agradeço também ao Prof. Dr. Francisco de Assis Correa, pelas orientações no campo da estatística.

À minha família, especialmente à minha esposa e filhas, Priscila e Flávia, que sempre me apoiaram em todas as decisões e torceram e sonharam comigo por mais este objetivo hoje alcançado.

Ao programa de pós-graduação da UNISANTA, pelos ensinamentos. Aos coordenadores e a todos os professores que fizeram parte desses dois anos.

Ao Prof. Daniel Alves Sodré, meu colega do SENAI pela amizade e momentos partilhados ao longo deste curso.

Ao Técnico de Qualidade Sr. Mauro Gasperetti, por sua contribuição com sugestões e discussões acerca do tema desta pesquisa.

À bibliotecária do SENAI, Srta. Caroline Dias, por seus apontamentos sobre a normalização acadêmica deste trabalho.

Enfim, a todos aqueles que, de uma maneira ou de outra, contribuíram para que este percurso pudesse ser concluído.

“O conhecimento amplo e satisfatório sobre um processo ou um fenômeno somente existirá quando for possível medi-lo e expressá-lo por meio de números”.

Lord Kevin, 1883

RESUMO

O trabalho aqui apresentado teve por objetivo relatar a evolução do controle dimensional no processo de fabricação de bielas em uma fábrica de caminhões, desde os anos 1980 até os dias atuais. A biela é responsável pela transmissão de potência no motor e a aplicação de um controle dimensional adequado à peça garante a confiabilidade do produto, além de ser um fator competitivo, pois permite identificar pontos de melhoria em comparação com sua concorrência. Neste contexto, a metrologia desempenha um dos seus mais significativos papéis, pois é através da medição correta que é possível a produção de peças qualitativamente melhores. Para responder ao tema proposto nesta pesquisa, foram consultados referenciais teóricos da área da metrologia e engenharia de motores, procurou-se descrever o que é um motor automotivo, suas características gerais, modo de funcionamento e seus componentes; além de fazer uma descrição mais detalhada sobre a biela, abordando seus aspectos de fabricação e seu papel no funcionamento de um motor. Também fez parte da revisão de literatura a metrologia e o controle dimensional, tratados a partir de seus instrumentos de controle, calibração, tolerância geométrica e a sua importância para a qualidade de um produto. Em Materiais e Métodos, tratou-se do controle dimensional realizado nas fábricas de caminhões até os anos 1980 e o controle realizado a partir de então, com as inovações que passaram a ser utilizadas no ramo. Uma análise estatística comparativa entre os processos antigos e os atuais também foi realizada. Percebeu-se que os processos realizados atualmente contribuíram para que o tempo gasto na medição de bielas seja nove vezes menor do que os processos utilizados até os anos 1980. Entretanto, foi percebido que não houve variação significativa nos resultados das medições realizadas. Por fim, é proposta para trabalhos futuros a análise da aplicação da técnica de medição óptica no controle dimensional de bielas, a fim de determinar se traria para a área maior confiabilidade na medição, redução de custos e tempo no processo.

Palavras-chave: Controle dimensional. Biela automotiva. Motor automotivo.

ABSTRACT

The work presented here aims to report the evolution of dimensional control in the connecting rod manufacturing process at a truck plant since the 1980s to the present day. The connecting rod is responsible for power transmission to the engine and the application of a suitable dimensional control ensures product reliability in addition to being a competitive factor, since it identifies points of improvement compared to their competition. In this context, metrology plays a role of its most significant, because it is through that correct measurement is possible to produce qualitatively best parts. To respond to the subject in this research, we were consulted theoretical references of the area of metrology and Engines Engineering, and we tried to describe what is an automotive engine, its general characteristics, mode of operation and its components; besides that, a more detailed description was given about the connecting rod, subject of this addressing, aspects of manufacturing and its role in the operation of an engine. Also part of metrology literature review and dimensional control, treated from their instrument control, calibration, geometric tolerance and its importance to the quality of a product. In Materials and Methods, it is described the dimensional control carried out in the truck plants until the 1980s and the control performed from then on, with the innovations that have come to be used in this business. A comparative analysis between the old processes and current is made. It is noticed that the processes currently performed contributed to the time spent connecting rods measuring is nine times smaller than the processes used until the 1980s. However, it was observed that there was no significant variation in the measurement results achieved. At last, it is proposed for future work the analysis of the application of the optical measurement technique in the dimensional control of connecting rods, in order to determine if it would bring to the area greater reliability in the measurement, reduction of costs and time in the process.

Keywords: Dimensional control. Automotive connecting rod. Automotive engine.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Modelo de biela.....	12
Figura 2 – Motor à diesel.....	18
Figura 3 – Quatro tempos do motor a diesel.	20
Figura 4 – Componentes estruturais do motor.	21
Figura 5 – Componentes de movimento do motor.	22
Figura 6 – Componentes de movimento do motor.	23
Figura 7 – Componentes de distribuição do motor.....	23
Figura 8 – Biela conectada ao pistão e à árvore de manivelas.	24
Figura 9 – Partes da biela.	25
Figura 10 – Manufatura tradicional da biela.	27
Figura 11 – Manufatura por divisão de fraturas da biela.	28
Figura 12 – Bielas convencionais.....	29
Figura 13 – Bielas fraturadas.	30
Figura 14 – Paquímetro universal.	34
Figura 15 – Micrômetro externo.	34
Figura 16 – Súbito.....	35
Figura 17 – Rugosímetro.....	35
Figura 18 – Centri-meter.	36
Figura 19 – Relógio apalpador com traçador de altura.	37
Figura 20 – Máquina de medir por coordenadas (MMC).	38
Figura 21 – Dispositivo entre-pontas na medição da biela.....	48
Figura 22 – Súbito na medição da biela.	49
Figura 23 – Micrômetro externo na medição da biela.....	50
Figura 24 – Rugosímetro portátil na medição da biela.	50
Figura 25 – Relógio apalpador com traçador de altura na medição da biela.....	51
Figura 26 – MMC tridimensional na medição da biela.....	53
Figura 27 – Medição da biela até o final dos anos 1980	54
Figura 28 – Medição da biela a partir dos anos 1990.....	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Diâmetro menor (forma antiga).....	56
Tabela 2 – Diâmetro menor – tabela ANOVA (forma antiga)	56
Tabela 3 – Diâmetro menor (forma atual).....	57
Tabela 4 – Diâmetro menor – tabela ANOVA (forma atual)	57
Tabela 5 – Diâmetro maior (forma antiga).....	58
Tabela 6 – Diâmetro maior – tabela ANOVA (forma antiga).....	58
Tabela 7 – Diâmetro maior (forma atual).....	59
Tabela 8 – Diâmetro maior – tabela ANOVA (forma atual).....	59
Tabela 9 – Entre centros (forma antiga).....	60
Tabela 10 – Entre centros – tabela ANOVA (forma antiga).....	61
Tabela 11 – Entre centros (forma atual).....	61
Tabela 12 – Entre centros – tabela ANOVA (forma atual).....	62
Tabela 13 – Tempos em segundos (forma antiga).....	62
Tabela 14 – Tempos em segundos – tabela ANOVA (forma antiga).....	63
Tabela 15 – Tempos em segundos (forma atual).....	63
Tabela 16 – Tempos em segundos – tabela ANOVA (forma atual).....	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABC Paulista	Cidades de Santo André, São Bernardo do Campo e São Caetano do Sul
ANOVA	Análise de Variância
CNC	Comando Numérico Computadorizado
DIN	Deutsche Institut für Normung
MMC	Máquinas de Medir por Coordenadas
OM	Objeto a Medir
SI	Sistema Internacional de Medidas

LISTA DE SÍMBOLOS

○	Circularidade
∅	Diâmetro
	Cilindricidade
//	Paralelismo
a	Número de operadores
α	Alfa
F_{calc}	Variância calculada
F_{crit}	Variância crítica
n	Numero de peças medidas
SQE	Soma dos quadrados entre os tratamentos
SQR	Soma dos quadrados residuais do tratamento
SQT	Soma total dos quadrados entre e residuais dos tratamentos
T^2	Soma dos quadrados dos elementos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Objetivos.....	14
1.2	Justificativa	15
1.3	Relevância do tema	16
1.4	Problematização	16
1.5	Hipóteses.....	17
2	O MOTOR AUTOMOTIVO, A FABRICAÇÃO DE BIELAS E SEU CONTROLE DIMENSIONAL.....	18
2.1	O motor automotivo	18
2.1.1	Características gerais dos motores a diesel	18
2.1.2	Funcionamento dos motores a diesel	19
2.1.3	Componentes dos motores a diesel	20
2.2	Biela.....	23
2.2.1	Aspectos de fabricação da biela	26
2.3	Metrologia e controle dimensional	30
2.3.1	Instrumentos de medição	33
2.3.2	Calibração	38
2.3.3	Tolerância geométrica	40
2.3.4	Importância da medição na qualidade	41
2.4	Estatística.....	42
2.4.1	Média.....	43
2.4.2	Variância.....	44
2.4.3	Desvio padrão	44
2.4.4	Intervalo de confiança.....	45
2.4.5	Teste de hipóteses	45
2.4.6	Análise da variância.....	46
3	MATERIAIS E MÉTODOS	47
3.1	Controle dimensional de bielas até os anos 1980	47
3.2	Controle dimensional de bielas a partir dos anos 1990	52
3.3	Análise da variância entre as formas de medição da biela analisadas.....	55
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	65
5	CONCLUSÃO	67
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68

1 INTRODUÇÃO

O presente trabalho tem o objetivo de relatar a evolução do controle dimensional no processo de fabricação da biela de um motor à combustão interna em uma fábrica de caminhões.

Assim como mencionado por Coelho (2014, p. 12), “A biela do motor é o componente responsável por transmitir a força recebida pelo pistão e repassar à árvore de manivelas ou virabrequim”. Dessa forma, a biela (Figura 1) sofre grandes impactos, o que exige que seja forte e ao mesmo tempo leve (MARTINS; GARCIA, 2010), sendo geralmente construída em aço forjado, alumínio ou titânio (LOUREIRO, 2009). A medição de seu peso garante a sua adaptação adequada ao tipo de motor em que será usada, assim como evita o desbalanceamento e desgaste precoce do motor (MARTINS; GARCIA, 2010).



Figura 1 – Modelo de biela.

Nesse contexto, a metrologia desempenha um dos seus mais significativos papéis, pois é através da medição correta que é possível a produção de peças qualitativamente melhores. Para todas as empresas que disputam mercados cada vez mais dinâmicos e concorridos, que buscam assegurar sua posição e seu crescimento, medir possibilita a busca da satisfação do cliente e a conquista de novos mercados.

Medir é uma necessidade que acompanha o homem desde tempos remotos, a ponto de a história da metrologia confundir-se com a própria história do homem, conforme afirmado por Albertazzi e Sousa (2015, p. 1-2):

Há milhares de anos, quando o homem intensificou a vida em grupo, a necessidade de estabelecer a comunicação interpessoal levou ao desenvolvimento das primeiras formas de linguagem. Com a evolução das primeiras sociedades a capacidade de contar [...] foi sendo desenvolvida aos poucos. A contagem de membros da família, de animais, e alimentos são alguns exemplos. [...] A descrição de certas quantidades apenas por números tornou-se ineficaz para algumas necessidades cotidianas. Era necessário acrescentar um elemento aos números para descrever de forma mais precisa as quantidades. O número de passos que caracterizam uma distância [...] ou o número de barris de vinho são alguns exemplos de unidades que passaram a ser usadas junto com os números para deixar a comunicação e as transações comerciais mais claras.

Nos últimos duzentos anos começaram a surgir esforços para a criação de um sistema único de medidas (LIRA, 2014). Apesar das tentativas de vários países, somente em 1960 foi criado o Sistema Internacional de Unidades – SI, durante a décima primeira Conferência Geral de Pesos e Medidas, uma convenção formada por vários Estados, incluindo o Brasil (SILVA NETO, 2012).

O Sistema Internacional é importante porque estabelece um padrão de medidas que pode ser compreendido em qualquer lugar do mundo. Em uma sociedade globalizada essa característica é essencial, pois grandes empresas multinacionais possuem plantas em diversos países, cada um desses países possui culturas diferentes e o sistema facilita a adoção de um mesmo padrão para todos.

Assim, “A metrologia tem como foco principal prover confiabilidade, credibilidade, universalidade e qualidade às medidas” (SILVA NETO, 2012, p. 3). Hoje é possível reproduzir qualquer medida com incertezas menores do que antigamente, especialmente porque o desenvolvimento alcançado pela metrologia é impulsionado pela evolução tecnológica da automação, área que nas últimas décadas obteve grandes avanços.

Os instrumentos de medição, por sua vez, asseguram essa maior exatidão justamente por serem padronizados e específicos para determinados tipos e tamanhos de peças (SILVA NETO, 2012).

Ao longo dos anos, vários instrumentos foram criados para medir as incertezas. No caso das bielas, foco deste trabalho, pode-se citar um breve histórico dos instrumentos que eram aplicados em sua medição, nos últimos trinta e cinco anos. O paquímetro, por exemplo, é um instrumento utilizado “para medir as dimensões

lineares internas, externas e de profundidade de uma peça” (SILVA NETO, 2012, p. 41).

Já o micrômetro externo é um instrumento que possibilita uma medição mais exata, pois sua leitura alcança centésimos de milímetros ou menos (SILVA NETO, 2012).

O súbuto (comparador de diâmetro interno) efetua “medições por comparação em diâmetros internos a diferentes profundidades, daí sua potencialidade na verificação de ovalização e cilindridade ou conicidade, por tocá-los em apenas dois pontos” (MITUTOYO, 2003, p. 62).

O rugosímetro permite avaliar a rugosidade existente na superfície de peças. A partir dos resultados obtidos com a sua utilização é possível comparar as medidas com valores de referência de especificações ou normas técnicas, por exemplo (SILVA NETO, 2012).

O centri-meter é um modelo de paquímetro que mede os centros de um componente. Este aparelho é destinado a medir as distâncias entre centros de furos.

Por fim, o relógio apalpador com traçador de altura é um instrumento que foi desenvolvido para “trabalhos de verificação geométrica (planeza, paralelismo, conicidade, excentricidade e etc.), controle dimensional por transferência de medidas” (MITUTOYO, 2003, p. 56). O relógio apalpador quando acoplado a um traçador de altura permite a sua fixação e posicionamento.

Atualmente, com o desenvolvimento propiciado pelas novas tecnologias de automação e informatização, a medição de peças e componentes vem sendo feita por meio da medição de coordenadas, através de máquinas e *softwares* que garantem precisão maior, mesmo em medições mais complexas. De acordo com Maas (2001, p. 1),

As MMCs [Máquinas de Medir por Coordenadas] medem características geométricas através de definição de pontos tomados sobre a superfície de um objeto a medir (OM) segundo um sistema coordenado espacial, seguido por processamento matemático. Algoritmos específicos ajustam os pontos tomados em elementos geométricos, possibilitando a representação geométrica do objeto medido.

1.1 Objetivos

Com base nos preceitos da metrologia e seus instrumentos de medição, este trabalho tem como objetivo apresentar uma evolução do controle dimensional no

processo fabril da biela desde os anos 1980 até os dias atuais, apontando para novas tendências.

Para tanto, faz-se necessário identificar todas as etapas de evolução do controle dimensional da biela, destacando as suas diferenças e melhorias ao decorrer dos anos e os diversos tipos de instrumentos e equipamentos de medição que surgiram.

Para obtenção dos dados e informações apresentados nesta pesquisa foram utilizados os dois métodos a seguir:

- a) pesquisa bibliográfica, através da leitura e estudo de livros, dissertações, teses e artigos que abordam direta e indiretamente sobre o tema apresentado;
- b) estudo de campo, através da observação direta e pesquisa na área de fabricação da biela de um motor, que se encontra em uma montadora localizada na região do ABC Paulista, Grande São Paulo;
- c) tratamento estatístico dos tempos de medição em cada processo estudado.

1.2 Justificativa

O principal fator motivador para o desenvolvimento desta pesquisa é a evolução tecnológica do controle dimensional de bielas, componentes do bloco do motor, que sofreu diversas mudanças e inovações ao longo dos últimos trinta e cinco anos.

Como professor de escola técnica, lecionando aulas de controle dimensional para alunos aprendizes do ramo produtivo industrial, o interesse em documentar a evolução da metrologia aplicada à medição surgiu naturalmente. Durante as aulas da disciplina, os alunos são orientados quanto aos instrumentos de medição e com eles realizam atividades em componentes do bloco do motor, como bielas, camisas, entre outros. Com a chegada de uma máquina de controle tridimensional na escola, os processos de ensino de medição foram alterados, mesclando instrumentos contemporâneos com outros mais antigos.

Essa nova realidade despertou um interesse em documentar a evolução pela qual a metrologia industrial passou, focando especialmente no controle dimensional de um componente específico, a biela, que sofreu maiores atualizações ao longo dos anos.

Desta forma, esta dissertação irá retratar o estágio em que se encontra o controle dimensional de bielas atualmente, no Brasil, com vistas a fornecer mais informações à área, pouco explorada em pesquisas industriais.

Assim, procura-se também sugerir melhorias na forma de controle de bielas, com base em novas tecnologias que estão sendo criadas, com vistas a possibilitar maior qualidade de medição, tendo como consequência a redução de custos, perdas e desperdício.

1.3 Relevância do tema

O tema desta pesquisa tem sua importância ao abordar o histórico evolutivo do controle dimensional de bielas, algo pouco retratado na literatura da área. Ao sugerir melhorias no seu processo, apontará tendências que podem gerar mudanças significativas na produção do componente, ao possibilitar redução de tempo de fabricação, que, por consequência, também implicará na redução de custos, perdas e desperdício.

De um ponto de vista particular, essa pesquisa contribuirá ao trazer um panorama da evolução do tema estudado, possibilitando um histórico comparativo aplicado à realidade fabril vivenciada pelos alunos da escola técnica mencionada anteriormente, que ao finalizarem o curso de aprendizagem passam a trabalhar no processo de produção de componentes do bloco do motor, em diversas frentes, inclusive no controle dimensional.

1.4 Problematização

Alguns problemas foram detectados ao iniciar a pesquisa do tema desta dissertação:

- a) é possível estabelecer uma linha evolutiva do controle dimensional da biela através do estudo da literatura da área e sua aplicação em uma planta fabril nos últimos trinta e cinco anos?
- b) existem melhorias que podem ser sugeridas nesse processo?
- c) existem ferramentas tecnológicas ou tecnologias desenvolvidas recentemente que possam ser utilizadas na produção de bielas?

1.5 Hipóteses

É provável que, com as pesquisas teóricas realizadas e trabalho de campo, esta dissertação obtenha um panorama efetivo da evolução do controle dimensional da biela, que sirva como base de estudo na área.

Supostamente existem tecnologias recentes aplicadas ao controle dimensional de diferentes componentes de um veículo que sejam passíveis de utilização também no processo de fabricação de bielas. Provavelmente essas novas tecnologias ainda não são utilizadas no Brasil, mas espera-se que com o estudo de sua aplicação nesta dissertação seja possível apontar novas tendências ao setor.

2 O MOTOR AUTOMOTIVO, A FABRICAÇÃO DE BIELAS E SEU CONTROLE DIMENSIONAL

2.1 O motor automotivo

Os motores automotivos podem ser de diversos tipos. Neste trabalho, procura-se dar um enfoque maior sobre os veículos pesados, como caminhões e ônibus, produtos principais da montadora analisada no estudo de campo. Desta forma, o motor abordado nesta seção é o motor a diesel, como será mais bem especificado adiante.

2.1.1 Características gerais dos motores a diesel

O objetivo de um motor, independentemente do tipo, é produzir a energia responsável pela propulsão do veículo.

Os motores a diesel fazem parte da categoria de motor à combustão interna. Como explica Bosch (2005, p. 448), “Os motores de combustão interna geram energia através da conversão de energia química contida no combustível em calor e o calor assim produzido, em trabalho mecânico”. Essa conversão é possível por meio da combustão.

A figura 2 apresenta um modelo de motor à diesel para veículos pesados.



Figura 2 – Motor à diesel.
Fonte: Cummins (c2016)

A Figura 2 é a representação de um motor a diesel. O motor é fabricado pela Cummins e o seu modelo é Motor Cummins Interact ISBe 6, produzido para ser utilizado em caminhões, ônibus e pickups.

2.1.2 Funcionamento dos motores a diesel

O motor a combustão interna, caso do motor a diesel, ao contrário do motor a gasolina que aspira gasolina e ar (para em seguida comprimir essa mistura a fim de obter ignição com uma centelha), comprime-o, garantindo uma taxa de compressão muito maior, e então injeta o combustível no ar comprimido, diretamente no cilindro, e o calor do ar comprimido inflama o combustível espontaneamente. O processo ocorrido no motor a diesel garante a geração de maior potência em comparação a motores que utilizam outros tipos de combustíveis.

Após a admissão do combustível e a produção de calor necessária para a expansão dos gases da combustão, o pistão é deslocado por meio da pressão criada nesse ambiente. Então, essa pressão é transmitida para a árvore de manivelas que gira para os pontos que se encontravam no ponto morto superior, que é o ponto mais alto do pistão dentro do cilindro, para o ponto morto inferior, o ponto mais baixo do pistão dentro do cilindro.

Varella e Santos (2010, p. 13), complementam: “A força vinda da expansão dos gases é transmitida para a árvore de manivelas, através da biela, promovendo assim o movimento de rotação do motor”. Assim, para finalizar o processo de funcionamento do motor, ocorre a descarga dos resíduos da combustão.

O número de tempos que o pistão leva para completar o ciclo varia segundo o tipo de motor. O motor a diesel para caminhões e ônibus necessita de quatro tempos para completar o seu ciclo de funcionamento. De acordo com Varella e Santos (2010, p. 12), “Os motores de quatro tempos são assim denominados porque realizam o ciclo em quatro cursos do pistão”. Cada um desses tempos é denominado: tempo de admissão, compressão, expansão e descarga. A Figura 3 resume bem o funcionamento de cada ciclo.

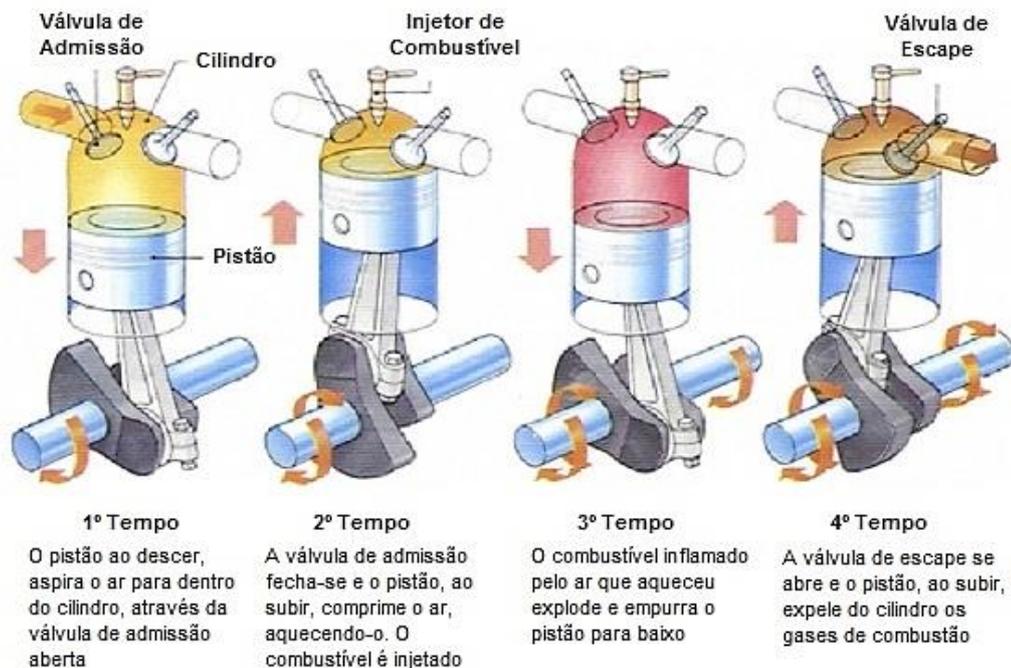


Figura 3 – Quatro tempos do motor a diesel.

Fonte: Souza (2014)

Como visto na Figura 3 acima, a **admissão** (1º tempo) refere-se ao tempo em que o motor aspira o ar para dentro do cilindro. Na **compressão** (2º tempo) o pistão comprime o ar dentro do cilindro, até gerar a combustão, necessária para o tempo da **explosão ou expansão** (3º tempo) caracterizada pela expansão do pistão para a posição do ponto morto inferior. Os tempos são finalizados com a **descarga ou escape** (4º tempo), em que o pistão retorna ao ponto morto superior, expulsando os gases da combustão do cilindro, pela válvula de escape (BOSCH, 2005).

2.1.3 Componentes dos motores a diesel

Os motores a diesel são compostos por componentes estruturais, componentes de movimento e componentes de distribuição.

Os componentes estruturais, mostrados na Figura 4, são: tampa de válvulas, cabeçote, bloco do motor, cárter e juntas.

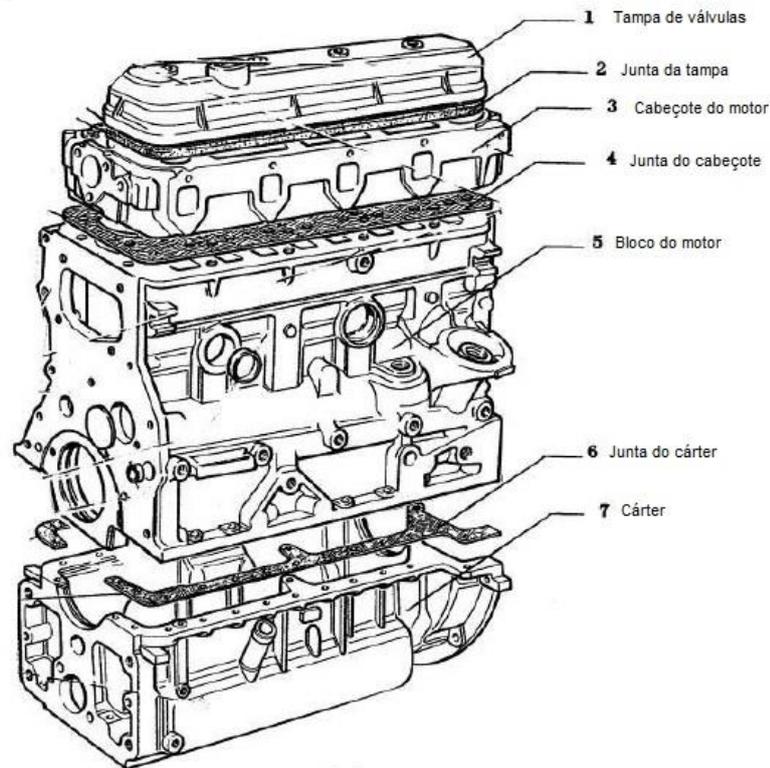


Figura 4 – Componentes estruturais do motor.

A tampa de válvulas tem função de proteger o conjunto de acionamento das válvulas.

O cabeçote abrange as válvulas e injetores. No cabeçote estão os condutos de admissão e de escape para a passagem dos gases.

O bloco do motor, juntamente com o cárter, “suporta o mecanismo de transferência de força entre o cabeçote do cilindro e o conjunto da árvore de manivelas” (BOSCH, 2005, p. 468). O bloco também é a superfície onde se monta a maior parte dos elementos do motor.

O cárter é a tampa inferior do motor que tem como função proteger os componentes internos, armazenar e resfriar o óleo lubrificante. A capacidade e o formato variam de acordo com o tamanho do motor. Os materiais mais usados na sua fabricação são o alumínio fundido e chapas de aço estampado.

Por fim, as juntas promovem a vedação do sistema.

Além dos componentes mostrados na Figura 4, existem os componentes de movimento, que são apresentados nas Figuras 5 e 6 e abarcam o pistão, pino, biela, árvore de manivelas ou virabrequim, polia e volante do motor, como detalhado abaixo:

- a) **pistão**: desloca-se dentro do cilindro para comprimir as misturas e tem a função de transmitir a força de expansão para os demais elementos do motor;
- b) **pino**: promove a fixação entre a cabeça do pistão e o corpo da biela;
- c) **biela**: “Em forma de haste, serve para transmitir o movimento linear alternativo do pistão para a árvore de manivelas. A biela é fixada nos mancais móveis ou de bielas do virabrequim e não fica em contato direto com o eixo” (VARELLA; SANTOS, 2010, p. 9). Sobre as bielas, a seção 2.2 trará informações mais complexas;
- d) **árvore de manivelas ou virabrequim**: “converte o movimento alternado dos pistões – transmitidos pelas bielas – em movimento rotativo, disponibilizando o torque efetivo na extremidade da árvore de manivelas” (BOSCH, 2005, p. 465);
- e) **polia**: transmite o movimento rotativo da árvore de manivelas até a árvore de comando das válvulas;
- f) **volante do motor**: armazena a energia requerida para movimentar o virabrequim ou árvore de manivelas.

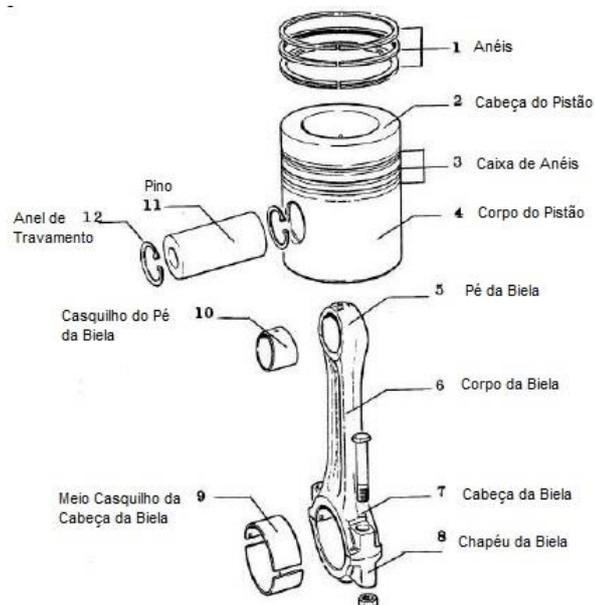


Figura 5 – Componentes de movimento do motor.

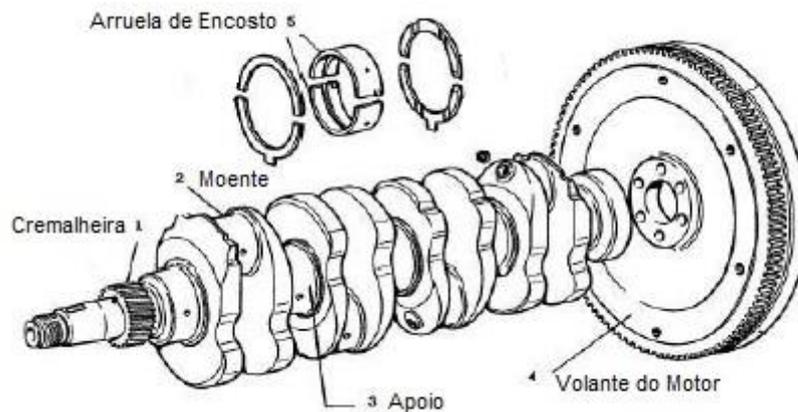


Figura 6 – Componentes de movimento do motor.

Por fim, os componentes de distribuição (Figura 7) são compostos por:

- a) **comando de válvulas:** “controla a abertura e fechamento das válvulas de admissão e descarga. Recebe movimento da árvore de manivelas, possui um ressalto ou came para cada válvula e gira com metade da velocidade da árvore de manivelas” (VARELLA; SANTOS, 2010, p. 6);
- b) **válvulas:** controlam a entrada e a saída de gases no cilindro do motor.

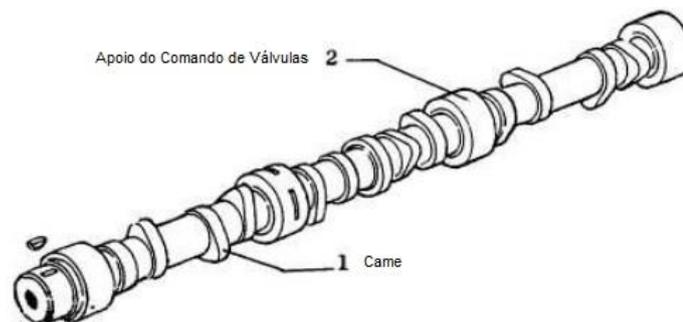


Figura 7 – Componentes de distribuição do motor.

A partir deste ponto será examinada a biela, que é o objeto de estudo do presente trabalho.

2.2 Biela

A biela, em conjunto com o pistão e o virabrequim (também chamado de árvore de manivelas), é responsável pela transmissão de potência, através da transformação do “movimento linear alternativo dos pistões em movimento rotativo

contínuo”, conforme explicado por Neves (2010, p. 2). Nesse contexto, a biela é um elemento de conexão entre o pistão e o virabrequim, conforme mostrado na Figura 8.

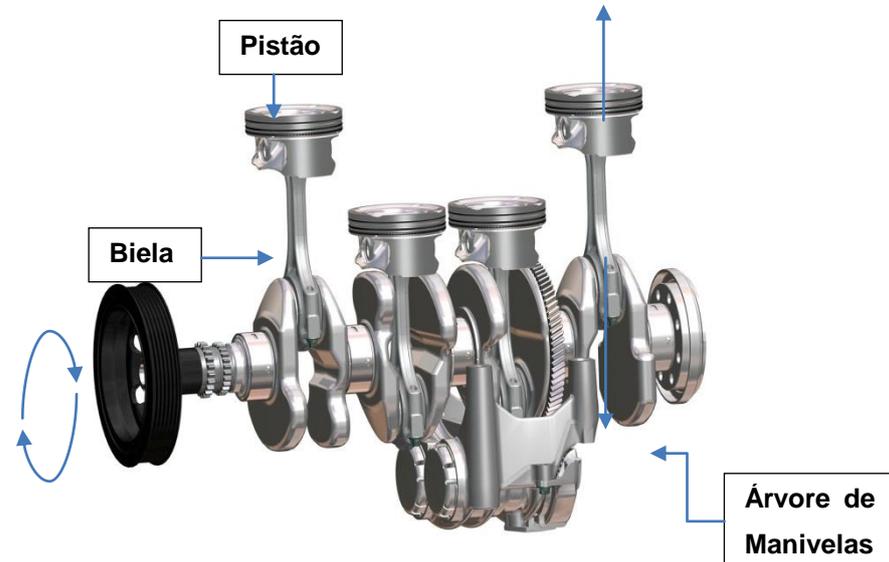


Figura 8 – Biela conectada ao pistão e à árvore de manivelas.

Fonte: Adaptado de Centro Técnica (2016)

Quando em funcionamento, a biela sofre choques e, por isso, precisa ser forte e leve, ao mesmo tempo, em sua composição física. Assim, geralmente é construída em “aço forjado, mas podem ser de alumínio ou até mesmo titânio, de modo a reduzir a sua massa” (LOUREIRO, 2009, p. 56). Martins e Garcia (2010, p. 9) ainda complementam que é em função disso que a biela foi desenvolvida com uma haste com dois olhais, em que um está ligado “ao pino do pistão enquanto o outro tem uma junção com os moentes (casquilhos), que correspondem aos colos móveis da árvore de manivelas” (MARTINS; GARCIA, 2010, p. 2).

Essas particularidades da biela devem-se ao fato comentado por Loureiro (2009, p. 56):

Durante o funcionamento do motor, a biela fica sujeita a forças de compressão muito elevadas, provenientes da fase de expansão do cilindro e a forças de tração, nas fases de admissão do motor. Sendo assim, as bielas são mais solicitadas nas condições de plena carga e de elevadas rotações do motor.

Silva (2013, p. 13-14) detalha ainda sobre o formato da biela: “esse componente pode ser dividido em chapéu, corpo e pé, de maneira que o chapéu e o corpo são unidos por dois parafusos”, conforme se pode observar na Figura9. O olhal maior da biela também pode ser chamado de “cabeça”.

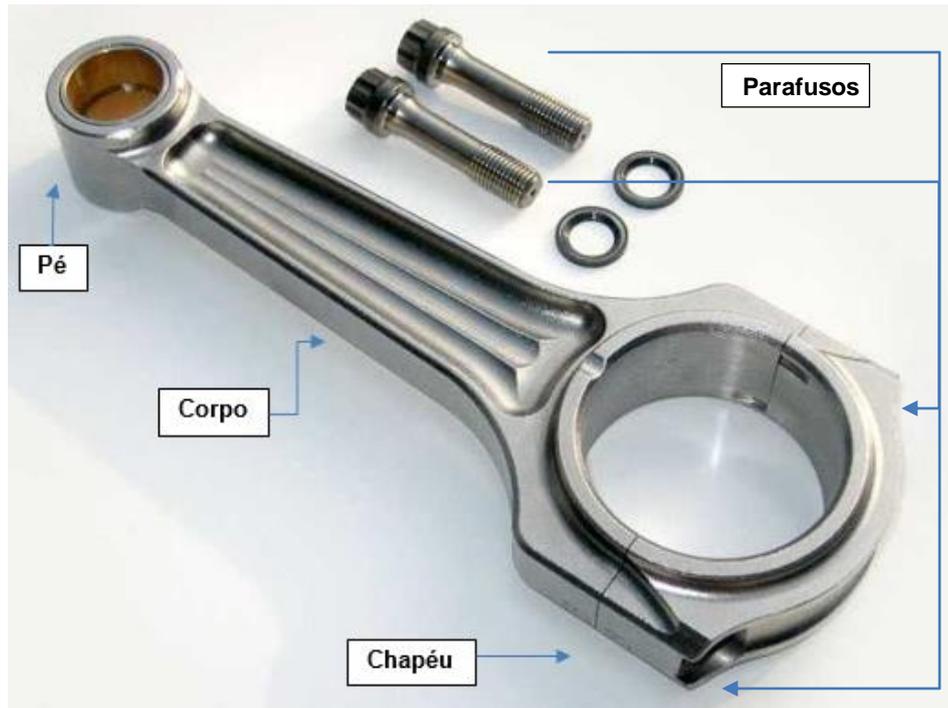


Figura 9 – Partes da biela.
 Fonte: Adaptado de Portal Auto (2016)

O chapéu da biela é uma de suas partes mais complexas, pois está ligada ao virabrequim através de um pino de manivela. Para que funcione perfeitamente uma série de componentes e técnicas são utilizadas. Para protegê-la do atrito, por exemplo, “o rolamento do mancal é utilizado entre a biela e o pino. Os rolamentos do mancal têm superfícies de contato não-conformes [...] que apoiam as partes móveis do conjunto do virabrequim. Uma película de óleo entre as interfaces impede o contato metal-metal” (Khare et al., 2012, p. 77-78).

Sobre sua trajetória, Silva (2013, p. 13-14) complementa:

Sua trajetória é composta pela translação de seu olhal menor e pela rotação de seu olhal maior em torno do centro de rotação do virabrequim. [...] O contato entre olhal maior e munhão¹ é intermediado por uma bronzina, componente cilíndrico feito de aço com uma fina camada de metal macio (geralmente uma liga) na sua face interna. A bronzina tem por meta prevenir o desgaste da biela, além de garantir a rotação do par biela/bronzina livremente em torno do centro de rotação do virabrequim. Na extremidade oposta, o contato é intermediado por uma bucha, que é posicionada sobre interferência no olhal menor.

¹**Munhão:** “entre o eixo e o mancal, é colocada uma peça de material menos resistente do que os dois elementos, de tal forma que, quando o eixo gira, é o munhão que se desgasta, e não o eixo ou o mancal, é muito utilizado no virabrequim (árvore de manivelas ou cambota) de motores de combustão interna, onde costuma ser de bronze” (PARETO, 2003).

Assim, a biela precisa ser projetada para funcionar adequadamente nas condições mencionadas acima. As suas especificações de construção serão tratadas adiante.

2.2.1 Aspectos de fabricação da biela

Uma biela pode apresentar diferentes formas e tamanhos dependendo do tipo e configuração do motor a que se destina (COELHO, 2014).

Em seu aspecto de fabricação, de acordo com Silva (2013, p. 13), “Por muitos anos, as bielas foram produzidas por forjamento de blocos de aço, porém havia um aspecto negativo decorrente desse processo: as inúmeras operações de usinagem necessárias para que o chapéu e o corpo pudessem ser posicionados corretamente (AFZAL, 2004)”.

Esse processo de manufatura tradicional da biela implica várias imperfeições e demanda retrabalho para que a peça esteja dentro dos padrões aceitáveis, como explica Silva (2013, p. 13-14): “No processo de forjamento clássico há duas opções: o forjamento em separado do chapéu e do corpo, ou o forjamento de uma única peça. Ambos os processos geram imperfeições na interface chapéu/corpo, implicando na adição de operações para corrigir essas imperfeições, o que encarece o produto final”.

Gu e outros (2005, p. 884) também relatam sobre o método tradicional de fabricação de bielas:

O método tradicional é uma técnica de usinagem, na qual a cabeça da biela é usinada por uma fresa e a biela é dividida em duas partes: a cabeça e o corpo. Na técnica, existem duas exigências principais. (1) A cabeça e o corpo devem ter alta precisão para unir as superfícies. (2) As partes tais como os parafusos usados para posicionar e as estruturas do furo da cabeça são muito complexas, e ainda assim para o furo da cabeça é demandada a conservação de um elevado nível vertical para superfícies. Todos esses requisitos aumentam grandemente a dificuldade do processo, procedimentos e custos.

A Figura 10 mostra as técnicas utilizadas nesse processo:

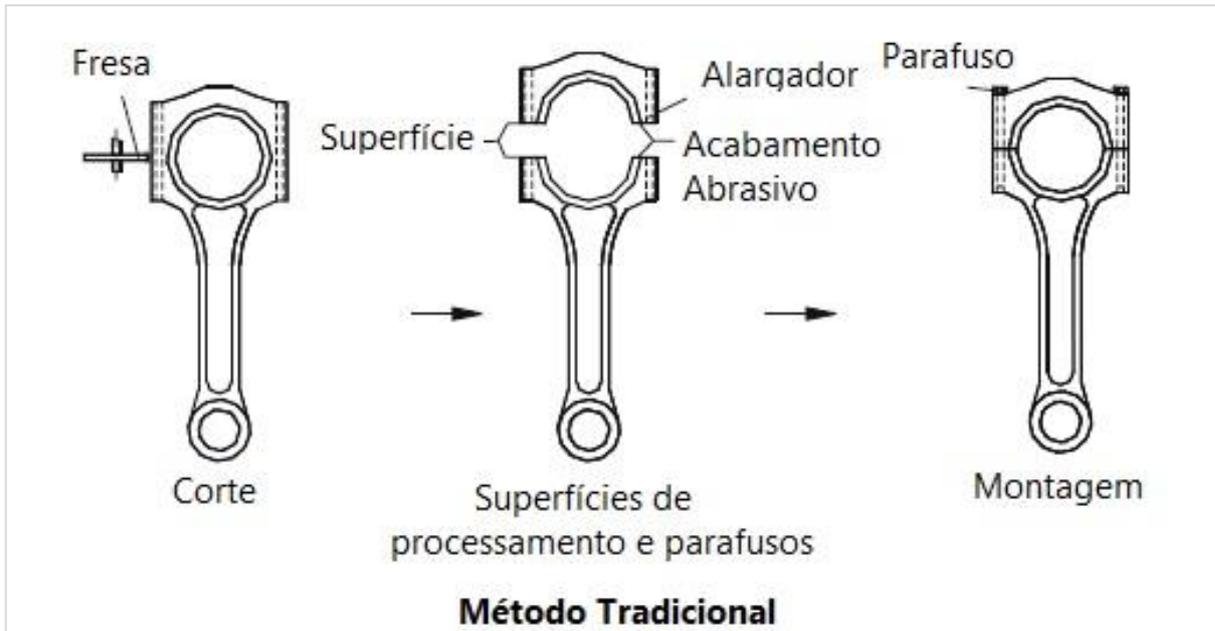


Figura 10 – Manufatura tradicional da biela.

Fonte: Gu *et al.* (2005, p. 884)

A partir do desenvolvimento da metalurgia do pó, o método de manufatura de bielas também se atualizou. De acordo com Silva (2013, p. 13-14), “o processo de fabricação substitui as matrizes de aço por uma mistura de metais e agentes ligantes, todos na forma de pó (AFZAL, 2004)”. Assim, “Essa mistura base era submetida à compactação, sinterização (aquecimento gradativo em ambiente controlado) e forjamento a quente” (SILVA, 2013, p. 13-14).

Foi a partir do uso da metalurgia do pó que a fabricação da biela conseguiu alcançar resultados melhores, evitando as etapas de acabamento para correção das imperfeições, como completa Silva (2013, p. 13-14):

[...] as características adquiridas pelo produto após esses processos, aliadas a uma operação específica de separação do chapéu e do corpo, foram capazes de eliminar as operações de acabamento na superfície de separação.

O uso deste processo contribui para um aumento de desempenho das bielas e um menor custo do produto usinado, acabado e montado (POWDER-FORGED..., 2005).

Ainda hoje é possível encontrar bielas fabricadas pelo método tradicional, mas com o intuito de otimizar a produção e reduzir os seus gastos, o processo é feito com “aços como o DIN C70 e aços micro ligados (MnVS4), eliminando, da mesma forma, as etapas de acabamento na interface de separação, além de apresentar

uma redução nos custos de fabricação quando comparado ao forjamento da matriz sintetizada (AFZAL, 2004)” (SILVA, 2013, p. 13-14).

Outra técnica bastante mencionada, por possibilitar grande eficiência e baixo custo de manufatura, é a divisão de bielas por fraturas, criada a partir do surgimento de novas tecnologias para produção de partes. Conforme afirmam Gu e outros (2005, p. 883),

A tecnologia de divisão de fratura da biela é um processo tecnológico inovador que aparece nos anos 1990. Comparado com o método tradicional, o processo possui as vantagens de aumentar a qualidade do produto e a eficiência de produção e de reduzir os custos e energia.[...] Agora a tecnologia está se tornando madura. Tem uma taxa baixa de defeitos e tem sido usada na produção em massa de alguns tipos de bielas.

A Figura 11 demonstra detalhadamente esse processo de fabricação de bielas pelo método de divisão de fraturas.

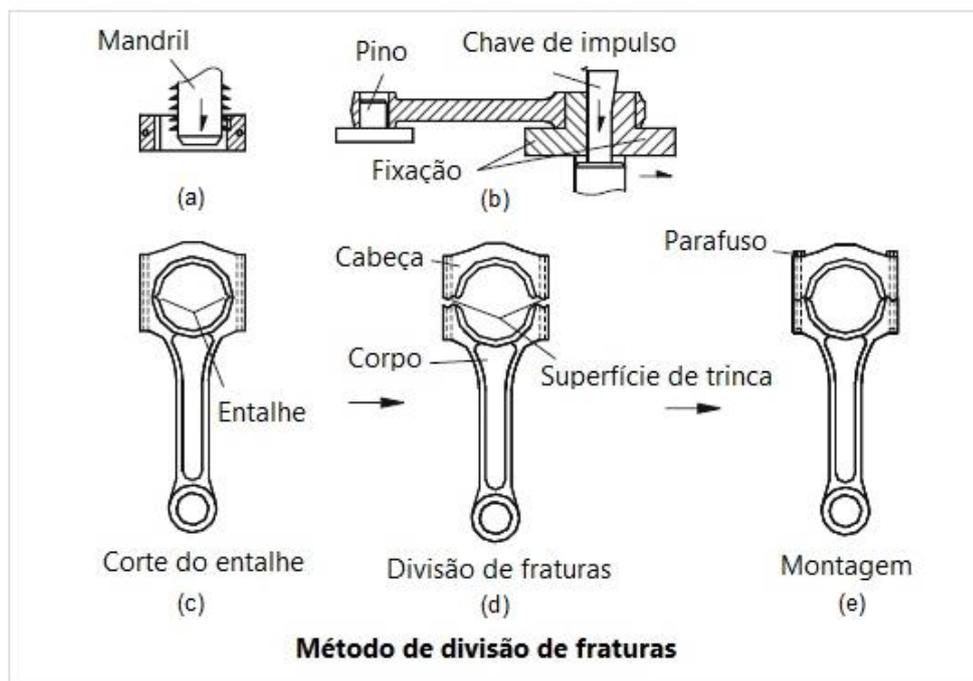


Figura 11 – Manufatura por divisão de fraturas da biela.

Fonte: Gu *et al.* (2005, p. 884)

Gu e outros (2005, p. 884) explicam, como visto na Figura 5, que

o lado interno do furo da cabeça da biela [que possui] dois entalhes simétricos com a mesma forma e tamanho são primeiramente usinados com mandril (a). Então, uma chave de impulso (b) com forma de cunha é desenhada para se mover para baixo e empurrar a fixação da cabeça para mover transversalmente, resultando em uma fratura frágil de dois entalhes

da cabeça (c) (d). Finalmente estas duas partes divididas são montadas com parafusos (e) em um equipamento especial, de modo a executar processos posteriores.

São essas trincas que garantem o encaixe perfeito entre a cabeça e o corpo, o que permite que as duas partes sejam posicionadas e montadas com exatidão. Sendo assim, “não é necessário usinar as superfícies articuladas da cabeça e do corpo e usar processos abrasivos para finalizar o processo do furo da cabeça e empregar partes como pinos inseridos, tarugos ou parafusos alargados para o posicionamento” (GU *et al.*, 2005, p. 884).

As Figuras 12 e 13 mostram as diferenças visualmente apresentadas entre bielas produzidas convencionalmente e através de fraturas. Percebe-se que as estruturas do parafuso tradicional e furo da cabeça são simplificados e o processo de usinagem também é reduzido.

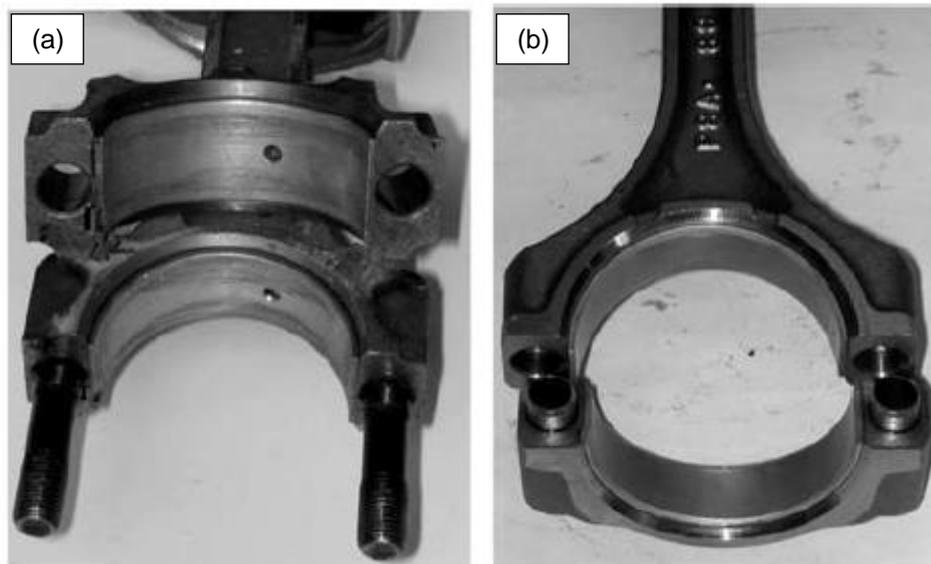


Figura 12 – Bielas convencionais.
Fonte: Adaptado de Gu *et al.* (2005, p. 884)

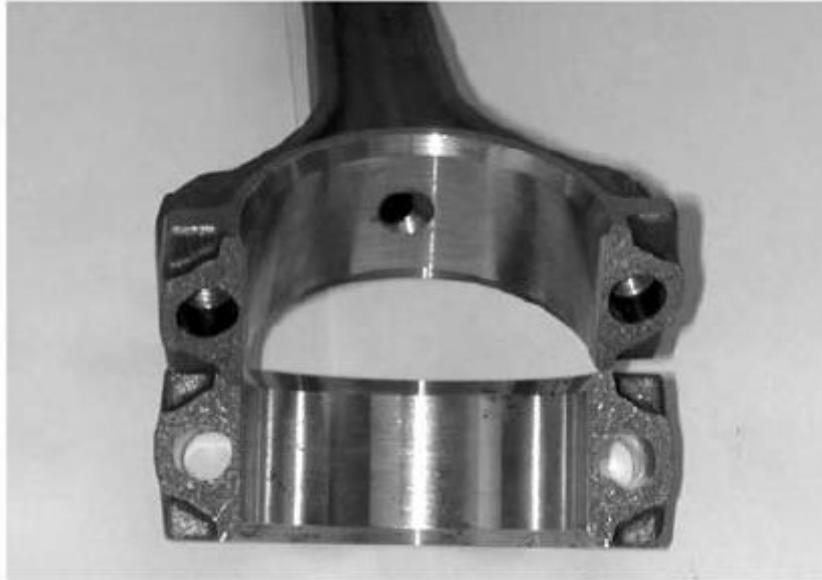


Figura 13 – Bielas fraturadas.
Fonte: Adaptado de Gu *et al.* (2005, p. 884)

Essas superfícies ásperas, apresentadas na Figura13, asseguram a combinação perfeita entre a cabeça e o corpo da biela e possuem uma superfície conjunta maior do que superfícies lisas usinadas convencionalmente. A precisão de processamento é melhorada devido à usinagem ser feita antes da fratura e a superfície áspera melhora o alinhamento e aumenta a qualidade do produto e simplifica as operações de montagem. A superfície conjunta maior aumenta a capacidade de suporte.

Sobre a técnica de fraturas, Huskonen (2006) também adiciona: “A divisão fraturada de aços permite que a haste e a tampa sejam separadas ao longo de uma linha de fratura predeterminada. Isso garante um ajuste perfeito entre as duas metades”. E o resultado que se obtém é “um componente com peso reduzido, performance melhorada e custos de manufatura menores” (HUSKONEN, 2006). Outro ganho que se pode mencionar é o custo do processo de tratamento térmico que se segue após o forjamento, que pode ser evitado (CON-ROD, 2003).

2.3 Metrologia e controle dimensional

A metrologia como conhecemos hoje se desenvolveu em função da expansão do comércio entre países. Era necessário haver um sistema de medidas que fosse compreensível em diferentes lugares do mundo, já que, até então, muitas medidas se baseavam em partes do corpo e variavam conforme a região de sua utilização e

como complementa Lira (2014, p. 29), “A base para cada sistema era a tradição; não havia coerência nem padrões exatos”. Assim, desde 1789 acompanha-se um esforço na criação e aprimoramento de sistemas internacionais de medidas, no sentido de unificar-se a forma de medir (Lira, 2014).

Dessa maneira, surge o Sistema Internacional de Unidades, “usado internacionalmente por acordos legais mesmo em países com sistema próprio [...]. O Sistema Internacional é um conjunto de definições” (LIRA, 2014, p. 31).

Como explicado por Fernandes, Costa Neto e Silva (2009, p. 2),

A metrologia, definida como a ciência da medição, tem como foco principal prover confiabilidade, credibilidade, universalidade e qualidade às medidas. Como as medições estão presentes, direta ou indiretamente, em praticamente todos os processos de produção industrial de tomada de decisão, a abrangência da metrologia é imensa, envolvendo a indústria, o comércio, a saúde, a segurança, a defesa e o meio ambiente, entre outros.

Além de dedicar-se a uniformização dos meios de medição, a metrologia subsidia diversas outras ações, sendo responsável especialmente pela confiabilidade na indústria, assegurando a qualidade dos produtos.

Fernandes, Costa Neto e Silva (2009) destacam que a metrologia pode ser dividida em três áreas:

- a) **científica**: “trata, fundamentalmente, dos padrões de medição internacionais relacionados ao alto nível de qualidade metrológica” (FERNANDES; COSTA NETO; SILVA, 2009, p. 3);
- b) **industrial**: “tem por função fomentar a produção com qualidade, atuando no processo, [...] atribuindo aos produtos melhor valor agregado e qualidade de consumo no mercado nacional” (FERNANDES; COSTA NETO; SILVA, 2009, p. 3);
- c) **legal**: “é a área da metrologia referente às exigências legais, técnicas e administrativas relativas às unidades de medidas, aos instrumentos de medir e às medidas materializadas” (FERNANDES; COSTA NETO; SILVA, 2009, p. 3).

Sobre a metrologia industrial, foco deste trabalho, Albertazzi e Sousa (2015, p. 6, *grifo dos autores*) acrescentam que, através dela, é possível “*monitorar, controlar e/ou investigar* processos ou fenômenos físicos”.

Assim, monitorar refere-se a “observar ou registrar passivamente o valor de uma grandeza”, algo utilizado “no comércio para atribuir valor comercial a produtos e para

o controle de estoques” (ALBERTAZZI; SOUSA, 2015, p. 6). Controlar objetiva “manter uma ou mais grandezas ou um processo dentro de limites predefinidos”, isso quer dizer que “O valor medido é comparado com o valor de referência e, em função do resultado da comparação, o sistema de controle atua sobre a(s) grandeza(s), ou sobre o processo, para mantê-lo(s) dentro dos níveis desejados” (ALBERTAZZI; SOUSA, 2015, p. 6-7). Por fim, o ato de investigar revela, através da observação, “a existência de fenômenos até então desconhecidos. Dispor de sistemas de medição capazes de indicar com grande segurança essas pequenas diferenças e de pessoas capacitadas para distinguir essas diferenças das margens de incertezas é um dos maiores fenômenos da metrologia” (ALBERTAZZI; SOUSA, 2015, p. 9).

Para Werner (2013, p. 24), o processo de medição pode ser descrito da seguinte maneira:

A medição acontece através de um processo experimental no qual o valor de uma grandeza física a ser medida é expressa por uma fração de uma unidade no qual está estabelecida por um padrão (THEISEN, 1997).

Conforme definição de Gonçalves e Sousa (2008, p.168) o “processo de medição é o conjunto de fatores envolvidos em uma operação de medição. Abrange o meio de medição, o procedimento de medição, o agente que efetua a medição, o método de medição e a clara definição do mensurando”.

Nas indústrias, este processo é feito constantemente, em que são realizadas as medições e os resultados obtidos são utilizados para o registro de conformidade e acompanhamento estatístico do produto.

Esse processo é essencial para garantir resultados seguros e confiáveis na medição. Entretanto, deve-se levar em consideração também a questão dos erros de medição, os quais o processo metrológico está sujeito inevitavelmente.

Sobre os erros de medição, Albertazzi e Sousa (2015, p. 10) salientam que:

Não existem sistemas perfeitos. Aspectos tecnológicos fazem com que qualquer sistema de medição construído resulte em imperfeições: suas dimensões, formas geométricas, material, propriedades elétricas, ópticas, pneumáticas, etc. não correspondem exatamente aos ideais. As leis e princípios físicos que regem o funcionamento de alguns sistemas de medição nem sempre são perfeitamente lineares, como uma análise simplista poderia supor. A existência de desgaste e a deterioração de partes agravam ainda mais essa condição. Portanto, o sistema de medição sempre gera erros.

A metrologia procura contornar esses erros ou incertezas de medição delimitando suas margens de ação, definindo “o tamanho da faixa, centrada em

torno do resultado-base, onde se espera encontrar o valor verdadeiro do mensurando”, calculando assim os “vários componentes da incerteza, normalmente por métodos estatísticos” (ALBERTAZZI; SOUSA, 2015, p. 12).

A seguir, o processo de medição será mais bem explicado através da apresentação dos instrumentos de medição, do conceito de calibração, tolerância geométrica e da importância da qualidade nesta área.

2.3.1 Instrumentos de medição

Os laboratórios de metrologia comportam os instrumentos necessários para a medição dos produtos ou peças desenvolvidas nas indústrias. Geralmente ficam próximos aos locais de processamento desses materiais (WERNER, 2013).

Lira (2014, p. 18) explica que os instrumentos de medição “servem como uma extensão das faculdades humanas, e podem ser tão simples como um gabarito, uma escala, ou um galvanômetro”. Atualmente, com o desenvolvimento de novas tecnologias, esses instrumentos também evoluíram, permitindo uma medição mais exata, “exigindo de seu operador o conhecimento do princípio de funcionamento e dos recursos incorporados, para utilizá-los de maneira eficiente” (LIRA, 2014, p. 18).

A função dos instrumentos de medição é “garantir maior exatidão das medidas” (SILVA NETO, 2012, p. 37). Entretanto, Silva Neto (2012, p. 37) explica que:

a escolha de um instrumento de medição não é tarefa simples. O primeiro cuidado a observar é com relação à exigência de exatidão da medida. Se uma medição exigir tolerância (variação permitida da peça) apertada, deve-se levar em consideração a resolução do instrumento. Além da resolução, devem-se considerar também o tipo e o tamanho da peça, pois a utilização de instrumento de medição inadequado acarreta erros de medição e compromete a qualidade da medida.

Assim, os instrumentos de medição mais apropriados para utilização na indústria automobilística são:

- a) **paquímetro:** “Esse instrumento consiste em uma régua graduada, com encosto fixo, sobre a qual desliza um cursor” (SILVA NETO, 2012, p. 41). É utilizado “para medir as dimensões lineares internas, externas e de profundidade de uma peça” (SILVA NETO, 2012, p. 41). Há vários modelos de paquímetro, como o da Figura 14, que representa um paquímetro universal;



Figura 14 – Paquímetro universal.

- b) **micrômetro externo:** o micrômetro (Figura 15) é um instrumento que possibilita uma medição mais exata do que o paquímetro, por exemplo, pois sua leitura alcança centésimos de milímetros ou menos (SILVA NETO, 2012). Lira (2014, p. 160) explica seu formato: “O princípio básico de construção do micrômetro é o deslocamento de uma haste mediante o giro de um parafuso roscado (fuso) o qual está acoplado a um tambor e a um cilindro fixo”;



Figura 15 – Micrômetro externo.

- c) **súbito (comparador de diâmetro interno):** efetua “medições por comparação em diâmetros internos a diferentes profundidades, daí sua

potencialidade na verificação de ovalização e cilindricidade ou conicidade, por tocá-los em apenas dois pontos” (MITUTOYO, 2003, p. 62). A Figura 16 apresenta um modelo de súbito;



Figura 16 – Súbito.

- d) **rugosímetro:** permite avaliar a rugosidade existente na superfície de peças usinadas. A partir dos resultados obtidos com o rugosímetro (Figura 17) é possível comparar as medidas com valores de referência de especificações ou normas técnicas, por exemplo (SILVA NETO, 2012). De acordo com Silva Neto (2012, p. 94), “O funcionamento do rugosímetro consiste, basicamente, em fazer percorrer a superfície da peça com um apalpador que possui um sensor que a toca”;



Figura 17 – Rugosímetro.

- e) **centri-meter:** é um modelo de paquímetro que mede os centros de um componente. Este aparelho (Figura 18) é destinado a medir as distâncias entre centros de furos.

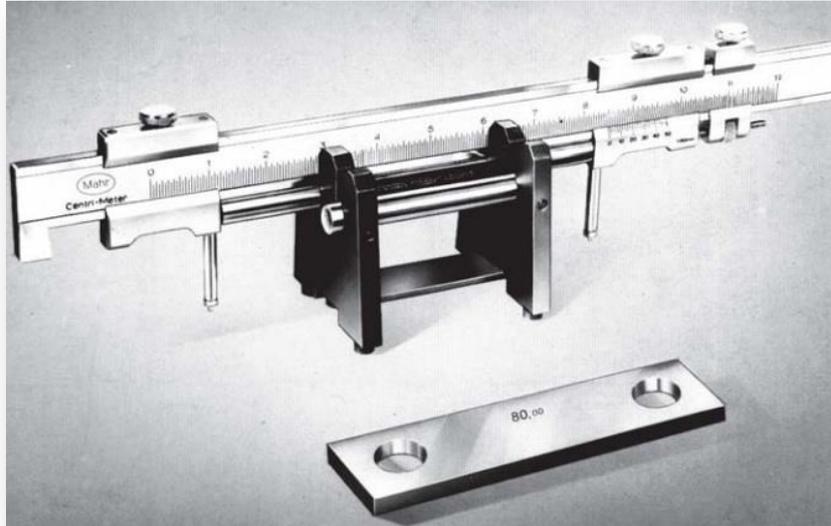


Figura 18 – Centri-meter.

- f) **relógio apalpador com traçador de altura:** “é um instrumento de medição por comparação dotado de uma escala e um ponteiro, ligados por mecanismos diversos a uma ponta de contato” (SILVA NETO, 2012, p. 58). Foi desenvolvido para “trabalhos de verificação geométrica (planeza, paralelismo, conicidade, excentricidade e etc.), controle dimensional por transferência de medidas” (MITUTOYO, 2003, p. 56). Na Figura 19 vemos que o relógio apalpador está acoplado a um traçador de altura para permitir sua fixação e posicionamento;



Figura 19 – Relógio apalpador com traçador de altura.

- g) **máquina de medir por coordenadas (MMC):** é composta por “um conjunto de equipamentos mecânicos (mesa, mancais, guias, etc.), eletrônicos (placas de servoamplificadores, etc.) e ópticos (escalas de medição eletro-ópticas), tudo isso gerenciado por computadores e por um software de medição” (TANAKA, 2009, p. 16). Diferentemente de outros instrumentos de medição, a MMC (Figura 20) é flexível e pode ser utilizada para variadas formas geométricas, especialmente “no controle geométrico de peças complexas, geralmente de difícil inspeção por métodos convencionais de medição” (MAAS, 2001, p. 1). Silva (2014, p. 397) acrescenta:

As MMCs são compostas por um sistema de coordenadas cartesiano em que os três eixos são lineares e perpendiculares entre si. Entre as principais características deste tipo de máquina destacam-se a robustez, alto grau de estabilidade e também um bom volume útil de medição, associado a uma grande exatidão.

Werner (2013, p. 25) também afirma que “A velocidade de resposta nas MMCs automáticas é muito alta, pois as medições são realizadas através de apalpações na peça onde os pontos são processados pelo computador que controla a máquina a través de um programa”.



Figura 20 – Máquina de medir por coordenadas (MMC).
Fonte: Hexagon Metrology (2011)

Os instrumentos de medição têm um papel importante na confiabilidade da medição, mas é importante mencionar que deve ser levado em consideração também as “habilidades do operador, as condições ambientais, o procedimento de medição e a própria definição do mensurando”, como cita Werner (2013, p. 26), pois são aspectos que também influenciam nos resultados da medição.

2.3.2 Calibração

Os instrumentos de medição são essenciais para conferir confiabilidade à indústria. Contudo, a ação do tempo e uso implicam erros de medição aos instrumentos. De acordo com Albertazzi e Sousa (2015, p. 127) “A plena caracterização dos erros sistemáticos e aleatórios, apresentados nas condições em que o sistema de medição é utilizado, é uma condição necessária para que os resultados obtidos sejam mais confiáveis”. Por isso, faz-se necessário o uso de técnicas de calibração periodicamente.

Fernandes, Costa Neto e Silva (2009, p. 3-4) definem a calibração, com base no Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia –VIM do INMETRO, como:

”Conjunto de operações que estabelece, sob condições especificadas, a relação entre os valores indicados por um instrumento de medição ou sistema de medição ou valores representados por uma medida materializada ou um material de referência, e os valores correspondentes das grandezas estabelecidos por padrões” (INMETRO, 2007), quando aplicada de modo otimizado, oferece um retorno financeiro, com geração de lucros, maior confiabilidade, credibilidade e conseqüente competitividade das empresas.

A calibração assegura a qualidade metrológica dos instrumentos de medição, bem como propicia maior qualidade e confiança aos produtos e serviços (FERNANDES; COSTA NETO; SILVA, 2009).

Para Albertazzi e Sousa (2015, p. 133), “Fundamentalmente, a calibração consiste em submeter um sistema de medição a valores conhecidos do mensurado, em condições bem definidas, e avaliar a sua resposta”. Assim, o processo de calibração é feito em laboratórios que utilizam valores de referência. “Os valores de referência da calibração são estabelecidos por padrões que são meios de medição de qualidade superior, cujo valor de referência é estabelecido com níveis excelentes de incerteza” (ALBERTAZZI; SOUSA, 2015, p. 128).

Após a calibragem será possível ao laboratório apontar os problemas identificados e as correções a serem feitas nos instrumentos avaliados. Albertazzi e Sousa (2015, p. 128) também afirmam que a calibração pode “determinar outras propriedades metrológicas como, por exemplo, os efeitos de grandeza de influência sobre a indicação, ou o comportamento metrológico de sistemas de medição em condições adversas de utilização”. Por fim, será emitido pelo laboratório um certificado de calibração, explicando a maneira como foi realizada.

Para ser preciso, o processo de calibração deve ser rastreável, isso quer dizer, segundo Fernandes, Costa Neto e Silva (2009, p. 4), que “deve estar atrelada a padrões de referência”, que podem ser nacionais ou internacionais. Os autores completam:

A rastreabilidade é responsável pela garantia de que a grandeza em processo de medição, ou controle, está obedecendo à cadeia de rastreabilidade. Em outras palavras, o quanto a medição está em acordo com um valor de referência conhecido, ou a qual distância de um valor verdadeiro se está reproduzindo essa medida. Tem-se, então, a importância da incerteza dos resultados em todos os níveis de comparação, desde a

comparação inicial com o padrão primário, até o instrumento reproduzindo essa medida diretamente no produto.

A rastreabilidade baseada em padrões internacionais assegura uniformidade nas medições, garantindo a compreensão do método de calibração utilizado em qualquer lugar do mundo (ALBERTAZZI; SOUSA, 2015).

2.3.3 Tolerância geométrica

Como vimos, as medições possibilitam estabelecer padrões a serem adotados na fabricação de produtos. Mesmo seguindo um padrão, sempre haverá imperfeições. Para que os defeitos de fabricação estejam dentro de valores aceitáveis, que não comprometam os produtos e os consumidores, existe a Tolerância Geométrica. Silva Neto (2012, p. 102) conceitua melhor:

Quando uma peça é fabricada, nem sempre é possível produzi-la com dimensões exatas, ou seja, sem nenhuma liberdade para mais ou para menos. Para que ela funcione normalmente, durante o processo de fabricação costuma ser permitida uma diferença para cima ou para baixo em suas dimensões. Define-se *tolerância* como a diferença entre a dimensão máxima e a dimensão mínima, ou seja, a diferença entre o afastamento superior e o afastamento inferior. Os afastamentos são desvios aceitáveis das dimensões nominais, para mais ou menos, que permitem a execução da peça sem prejuízo para seu funcionamento e intercambialidade.

De acordo com Albertazzi e Sousa (2015, p. 280, *grifo dos autores*), a “**Tolerância** é a faixa de variação aceitável para uma característica de um produto, definida de forma a garantir a qualidade com que ele realiza a tarefa para a qual foi projetado. Deve ser feita com base de análise bem ampla”.

As faixas de tolerância podem ser estreitas ou amplas. Quanto mais estreita, maior o gasto da empresa com a qualidade do produto e menor a sua margem de lucro. Por isso Albertazzi e Sousa (2015, p. 280, *grifo dos autores*) explicam: “Visando encontrar um bom equilíbrio técnico-econômico, os projetistas então definem as *maiores tolerâncias possíveis* que, ao mesmo tempo, *preservem a qualidade* com que o produto realiza sua função e *barateiem a produção*. O equilíbrio favorável da relação custo-qualidade deve ser sempre buscado”.

2.3.4 Importância da medição na qualidade

A medição é uma das maneiras de garantir a qualidade dos produtos fabricados em uma indústria, por isso faz parte do sistema de controle da qualidade. A metrologia é considerada também como um fator competitivo, pois permite identificar pontos de melhoria em um produto em comparação com sua concorrência, com padrões estabelecidos (FERNANDES; COSTA NETO; SILVA, 2009). De acordo com os autores,

A Qualidade não pode ser dissociada da metrologia, pois as especificações dos projetos, dadas por normas, são controladas por instrumentos e sistemas de medições que tenham sua capacidade de medição atestada. Nestas condições, as especificações das características dos produtos estarão sendo medidas corretamente. Caso as variáveis monitoradas estejam fora dos parâmetros de fabricação do produto, a metrologia interage com o processo produtivo, agindo na sua correção e melhoria contínua, como um autêntico ciclo PDCA (Planejar, Fazer, Controlar e Agir) (FERNANDES; COSTA NETO; SILVA, 2009, p. 12).

E essa atuação da metrologia associada à Qualidade, permite as práticas de melhoria contínua, atendendo a exigências do consumidor por produtos de qualidade maior com um preço competitivo, assim como respeitando regras e normas governamentais (FERNANDES; COSTA NETO; SILVA, 2009; ALBERTAZZI; SOUSA, 2015).

Para conseguir manter margem de lucro oferecendo produtos de qualidade, as empresas precisam encontrar um ponto de equilíbrio no que tange ao fator custo-qualidade.

O aumento da qualidade na produção requer parcerias com fornecedores bons, uma organização administrativa adequada da empresa e atenção ao mercado e ao relacionamento com os clientes. Por isso, aumentar a qualidade adiciona um custo grande às empresas, assim como não prestar a atenção a esse fator e oferecer um produto sem muita qualidade também (ALBERTAZZI; SOUSA, 2015).

Sobre os custos da qualidade e da não-qualidade, Albertazzi e Sousa (2015, p. 283-284) afirmam:

Os custos decorrentes de falhas nos produtos e processos, ocorridos internamente (dentro da empresa) e externamente (fora), são conhecidos como custos da não-qualidade.

Alguns desses custos podem reduzir significativamente a margem de lucro da empresa. Outros podem vir a ser fatais para a sua sobrevivência.

Nos caminhos para minimizar os problemas da não-qualidade, empresas investem em pessoas, equipamentos e métodos de trabalho, que levem a uma melhoria na qualidade dos produtos.

Ao fazer esse investimento, a empresa estará agregando novos custos ao sistema produtivo. São os chamados custos da qualidade, que incluem todos os custos relacionados à avaliação e prevenção de não-conformidades.

A metrologia interfere nessa equação ao controlar a qualidade por meio das medições da produção feita em 100% dos produtos produzidos ou por meio de amostragem de uma porcentagem desses produtos.

O controle de 100% da produção assegura a avaliação integral dos produtos e também demanda um custo maior para isso, podendo ser inviável na maior parte das empresas (ALBERTAZZI; SOUSA, 2015).

Já o controle da qualidade por meio de amostragem, como assinala Albertazzi e Sousa (2015, p. 296-297),

[...] envolve um esquema estatisticamente bem planejado. [...] Em essência, são extraídas amostras de produtos do processo em uma frequência bem estabelecida, que pode variar de poucas peças por dia a várias peças por hora. Seus parâmetros de interesse são medidos e estatisticamente avaliados. Se o processo produtivo permanece estável [...] a produção deverá continuar sem intervenção. No momento em que são detectadas tendências do processo em se aproximar [do processo com grande capacidade, porém, com valor médio afastado do valor central das especificações] [...], uma intervenção deve ser efetuada no processo antes que peças fora das especificações venham a ser produzidas.

Cabe a cada empresa avaliar qual o melhor método a ser utilizado em sua realidade. Independente da escolha, a medição estará presente para assegurar a qualidade dos produtos.

2.4 Estatística

Conforme conceitua Milagre (2001, p. 60) a “Estatística é o estudo dos processos de obtenção, coleta, organização e análise de um conjunto de dados relevantes e referentes a qualquer fenômeno numericamente quantificável, sobre uma população, coleção ou conjunto de seres”. Através de sua aplicação, uma miríade de problemas pode ser solucionada, assim como a tomada de decisões em casos de incerteza é facilitada.

Tratar uma informação coletada estatisticamente quer dizer “obter dados certos através de uma coleta eficiente, desconfiar de dados sem dispersão, estratificar os

dados, certificar-se de que o método estatístico é capaz de revelar os fatos e agir com base nos dados”, conforme explica Milagre (2001, p. 60-61).

Assim, partindo por este ponto de vista, é necessário entender também o que é média, variância, desvio padrão, intervalo de confiança, teste de hipóteses e análise da variância, para melhor compreensão dos dados estatísticos que serão demonstrados adiante, em Materiais e Métodos.

2.4.1 Média

A média é uma das ferramentas estatísticas mais utilizadas por possuir uma fórmula simples e de fácil aplicação.

Aguiar Neto (2009, p. 99) explica que a média representa o “resultado da divisão da soma de todos os valores da variável pela quantidade de dados”. Sua fórmula é expressa da seguinte maneira:

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} \quad (1)$$

Sendo:

\bar{x} a média aritmética;

x_i os valores da variável;

n o número de valores (CRESPO, 2011).

O uso da média apresenta vantagens e desvantagens, como menciona Aguiar Neto (2009, p. 99): entre as vantagens pode-se citar que a sua fórmula é “de fácil compreensão e aplicação; pode ser calculada com precisão matemática; considera todos os dados da amostra ou da população e pode ser usada quando dispomos apenas do valor total e do número de elementos”. Entre os aspectos desvantajosos do uso da média, destaca-se o fato de que “não pode ser aplicada a dados qualitativos; nem sempre aparece entre os dados originais; depende do conhecimento de todos os valores da distribuição e é muito sensível a valores extremos, podendo, em alguns casos, não representar a série de forma satisfatória”.

2.4.2 Variância

Como vimos, a média pode apresentar algumas falhas de representação. Para contornar essas falhas e obter uma estatística confiável, a variância é utilizada, pois considera “a totalidade dos valores da variável em estudo” (CRESPO, 2011, p. 105).

De acordo com Crespo (2011, p. 105), a variância “baseia-se nos desvios em torno da média aritmética, porém determinando a **média aritmética dos quadrados dos desvios**”.

Aguiar Neto (2009, p. 122) também complementa: “A variância corresponde ao somatório do quadrado da diferença entre cada valor do conjunto e a média do conjunto, posteriormente dividido pela quantidade de valores do conjunto”. Sendo assim, sua fórmula é expressa da seguinte maneira:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n} \quad (2)$$

Sendo que “ n é o número de elementos do conjunto de dados; x_i é o elemento de ordem i do conjunto; e μ é a média aritmética do conjunto” (AGUIAR NETO, 2009, p. 122).

2.4.3 Desvio padrão

O desvio padrão é utilizado para calcular os desvios das entradas da média. “Quanto mais espalhadas estiverem as entradas, maior será o desvio padrão” (LARSON; FARBER, 2013, p. 72). Assim, é definido como “a **raiz quadrada da variância** e representada por **s**: $s = \sqrt{s^2}$ assim $s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n}}$ ” (CRESPO, 2011, p. 106).

Aguiar Neto (2009, p. 124) explica a importância do uso do desvio padrão:

O desvio padrão é a medida mais utilizada na avaliação do grau de variabilidade de uma distribuição ou na comparação da variabilidade de diferentes distribuições. Afora isso, ele também se presta para ajustar a posição relativa de escores individuais dentro de uma distribuição. Nesse sentido, ele é um padrão contra o qual avaliamos a colocação de um escore [...] dentro de toda a distribuição.

2.4.4 Intervalo de confiança

O intervalo de confiança é uma estimativa de um intervalo onde a média de um parâmetro de uma amostragem tem a probabilidade de acontecer. Esse intervalo é calculado levando-se em consideração a estimativa pontual, a estimativa intervalar, o nível de confiança, o erro de amostragem e a margem de erro.

A estimativa pontual “é um valor único estimado em um parâmetro populacional. A estimativa pontual menos tendenciosa de uma média populacional μ é a média amostral \bar{x} ” (LARSON; FARBER, 2013, p. 251).

Já a estimativa intervalar “é um intervalo, ou amplitude de valores, usado para estimar um parâmetro populacional” (LARSON; FARBER, 2013, p. 252).

O nível de confiança “é a probabilidade de que o intervalo estimado contenha o parâmetro populacional” (LARSON; FARBER, 2013, p. 252).

O erro de amostragem representa a “diferença entre a estimativa pontual e o valor real do parâmetro” (LARSON; FARBER, 2013, p. 253).

A margem de erro ou tolerância de erro, de acordo com Larson e Farber (2013, p. 253) “é a maior distância possível entre o ponto de estimativa e o valor do parâmetro que está estimando”.

Assim, Larson e Farber (2013, p. 257) comentam:

Para a mesma amostra estatística, conforme o nível de confiança aumenta, o intervalo de confiança fica mais largo. Conforme o intervalo de confiança fica mais largo, a precisão da estimativa decresce. Uma maneira de aumentar a precisão de uma estimativa sem decrescer o nível de confiança é aumentar o tamanho da amostra.

2.4.5 Teste de hipóteses

De acordo com Larson e Farber (2013, p. 293) “Um **teste de hipótese** é um processo que usa estatísticas amostrais para testar a afirmação sobre o valor de um parâmetro populacional”. Ou seja, trata-se de alternativas hipotéticas que são testadas para comprovar se são verdadeiras ou falsas. Vários setores da indústria confiam nos testes de hipóteses para a tomada de decisões.

Para se estabelecer uma hipótese é necessária uma afirmação sobre um parâmetro populacional. Larson e Farber (2013, p. 294) afirmam que,

Para testar um parâmetro populacional, você deve afirmar cuidadosamente um par de hipóteses – uma que represente a afirmação e outra, seu complemento. Quando uma dessas hipóteses for falsa, a outra deve ser verdadeira. Qualquer uma das hipóteses – a *hipótese nula* ou a *hipótese alternativa* – pode representar a afirmação original.

Apesar do teste de hipóteses utilizar análises de probabilidade para inferir parâmetros desconhecidos de uma determinada população, sua análise é baseada em uma amostra, sendo possível que o teste induza ao erro em algumas situações (LARSON; FARBER, 2013).

2.4.6 Análise da variância

A análise da variância “é uma técnica de teste de hipótese usada para comparar médias de três ou mais populações. A análise da variância geralmente é abreviada como **ANOVA**” (LARSON; FARBER, 2013, p. 469).

Para analisar a variância de um fator, é preciso determinar uma hipótese alternativa e uma nula. “Quando você rejeita a hipótese nula em uma ANOVA, você pode concluir que, no mínimo, uma das médias é diferente das demais. Sem fazer outros testes estatísticos, porém, você não consegue determinar quais das médias é diferente” (LARSON; FARBER, 2013, p. 469).

Um passo-a-passo também é sugerido para se observar em um teste de variância, conforme indica Larson e Farber (2013, p. 469):

1. Cada amostra deve ser selecionada aleatoriamente de uma população normal ou aproximadamente normal.
2. As amostras devem ser independentes entre si.
3. Cada população deve ter a mesma variância.

Concluindo, a análise da variância é usada para se definir se as diferenças amostrais são reais (significativas) ou casuais (eventuais).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O processo de fabricação de uma biela envolve diversas atividades dentro de uma linha de produção até que a peça esteja adequadamente construída e montada para posterior utilização no motor automotivo. Ao longo deste processo podem ocorrer imperfeições em sua fabricação, em um determinado lote de peças. Como vimos na seção anterior, este é um dos motivos que impulsionaram a criação do controle dimensional, assim como é um fator que estimula a atualização constante de seus instrumentos de medição, a fim de detectar erros de fabricação e assegurar um produto de maior qualidade ao consumidor final.

Assim, em uma fábrica automotiva, a linha de produção de uma biela produz a peça e, então, seleciona uma determinada quantidade dessas peças para a realização do controle dimensional, por amostragem. Após esta etapa é possível avaliar os produtos que foram produzidos em conformidade com suas especificações e também aqueles que precisarão de ajustes ou descarte, em caso de inadequação impossível de ser revista sem prejudicar a sua funcionalidade.

Desta forma, propõe-se analisar nesta seção como era realizado o controle dimensional de bielas em uma determinada fábrica automotiva até o final dos anos 1980 e a forma adotada para tal a partir dos anos 1990, época que marca a aplicação de novos tipos de instrumentos de controle, impulsionada pelo avanço tecnológico que a nossa sociedade tem vivenciado nas últimas décadas.

3.1 Controle dimensional de bielas até os anos 1980

O modelo de biela fabricado até os anos 1980 incluía em sua montagem pino, parafuso e porca, tampa e o corpo da biela. A junção da tampa com o corpo da biela era feita através de dois pinos invertidos. Quando a montagem do conjunto de biela e tampa chegava na linha, eram colocados os casquilhos, localizados no virabrequim (ou árvore de manivelas), e posicionada a tampa pelos pinos de localização, que eram, então, unidos pelo torque.

Para esse tipo de peça, o controle dimensional aplicado utilizava os seguintes instrumentos e dispositivos de medição:

- a) **traçador de altura montado com relógio apalpador milesimal**, para a verificação de controle da simetria; os batimentos da face do olhal maior; paralelo e torção do olhal menor, em relação ao olhar maior;
- b) **micrometro externo**, para a verificação de controle da espessura da biela;
- c) **súbito**, para a verificação de controle das medidas dos diâmetros internos dos olhais e verificar a circularidade e cilindridade;
- d) **rugosímetro**, para a verificação de controle do acabamento superficial das faces e dos diâmetros exigidos no desenho técnico da peça;
- e) **centri-meter**, para a verificação das distâncias entre centros dos dois furos da biela;
- f) **eixo cônico retificado**, para a verificação de controle do eixo da biela. Esse eixo tem uma leve conicidade e é encaixado no diâmetro maior do olhal e preso entre-pontas para controlar o batimento das faces laterais do olhal maior e o paralelo e a torção do olhal menor da biela;
- g) **entre-pontas** (Figura 21), dispositivo para a fixação e movimentação da biela durante a medição;
- h) **calço regulável de altura**, dispositivo para nivelar a biela durante o controle dimensional.



Figura 21 – Dispositivo entre-pontas na medição da biela.

Assim, o processo de controle da biela buscava aferir a adequação do dimensionamento dos diâmetros, espessura, rugosidade e simetria das peças.

Para o dimensionamento dos diâmetros, eram utilizados o súbito (que é ideal para comparar os diâmetros internos da peça e verificar a circularidade e cilindridade), demonstrado na Figura 22, o anel padrão (para calibrar o súbito) e o relógio comparador milesimal montado no súbito (para identificar as medidas e variações encontradas), que permitia uma precisão maior na medição. Nesta etapa eram dimensionados o diâmetro do olhal maior e o diâmetro do olhal menor da biela.



Figura 22 – Súbito na medição da biela.

Para o dimensionamento da espessura, era utilizado o micrômetro externo milesimal (Figura 23), que era então o instrumento ideal para o controle de medidas externas.



Figura 23 – Micrômetro externo na medição da biela.

Já a rugosidade era controlada através do rugosímetro portátil (Figura 24), que através de seu apalpador tocava a peça para detectar a rugosidade existente nos diâmetros da superfície das peças. Para a realização dessa medição também se fazia necessária a utilização de uma base magnética para fixar a peça durante a medição e uma base reguladora de altura para o rugosímetro.

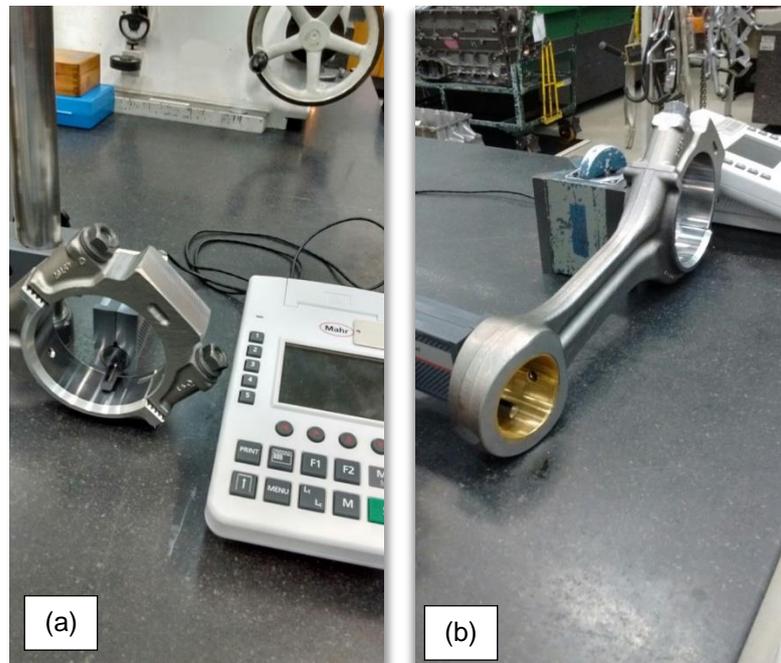


Figura 24 – Rugosímetro portátil na medição da biela.

Legenda: (a) Rugosímetro verificando olhal maior; (b) Rugosímetro verificando olhal menor

E a verificação da simetria das peças era feita com o relógio apalpador centesimal (para verificar planeza, paralelismo, conicidade, excentricidade) e um traçador de altura (Figura 25), que permite a fixação e posicionamento das peças. Além disso, também é necessário o uso de uma base magnética para fixação da peça durante a medição. A etapa de controle da simetria buscava identificar a simetria entre as espessuras do olhal maior e menor.



Figura 25 – Relógio apalpador com traçador de altura na medição da biela.

Essa verificação do controle dimensional nas peças selecionadas para a amostragem era realizada diariamente, na sala de medição, próxima à linha de produção da biela e levava em torno de três horas por peça para ser realizado.

Contudo, antes de chegar na sala de medidas, o operador da linha realizava um controle funcional em algumas peças selecionadas, por meio de calibradores passa-ou-não-passa, paquímetro e outros dispositivos para averiguar a viabilidade do lote na montagem da biela.

Após esse processo, as peças selecionadas para amostragem eram enviadas à sala de medidas, onde todos os instrumentos eram separados na mesa de traçagem

para realizar o controle dimensional mais preciso da biela. A partir de um desenho técnico padrão, em folha A4, que continha as dimensões e tolerâncias denominadas, eram realizadas as medições da biela. Ao final da medição gerava-se um relatório dimensional consolidando as medidas verificadas, de acordo com as especificações contidas no desenho técnico padrão.

As peças com dimensões fora das especificações do desenho padrão eram apontadas no relatório, bem como as peças eram sinalizadas para identificar a sua reprovação no processo de controle dimensional. O setor de usinagem, responsável pela fabricação da biela, então era comunicado para avaliar a viabilidade de correção das peças ou o encaminhamento para refugo ou descarte.

3.2 Controle dimensional de bielas a partir dos anos 1990

O modelo de biela fabricado a partir dos anos 1990 inclui em sua montagem um sistema de estrias, na tampa da cabeça da biela e rosca em seu corpo. Recentemente, tem-se também a fabricação de bielas craqueadas. Essa técnica consiste em quebrar a peça, dividindo-a ao meio, para formar a tampa e o corpo da biela. Há ainda a tecnologia de fabricação *FormBohung*, que consiste em criar uma bolsa de óleo no olhal menor da biela.

A maior parte desses modelos de biela citados incluem na aplicação do controle dimensional instrumentos de medição como a máquina de medir por coordenadas (MMC) tridimensional e o rugosímetro. No caso da biela fabricada com a tecnologia *FormBohung*, o seu controle é feito também, através de uma medição especial, com o uso do apalpador da MMC, que mede através de um sistema de varredura de alta precisão, em milésimos de milímetros. Essa redução na quantidade de instrumentos necessários para medir mostra-nos como os avanços tecnológicos beneficiaram a área.

Assim como o processo de controle da biela utilizado até o final dos anos 1980, o controle dimensional atual busca aferir a adequação do dimensionamento dos diâmetros, espessura, rugosidade e simetria das peças, com o auxílio dos instrumentos descritos acima.

A máquina tridimensional (Figura 26) realiza a verificação de controle da biela, abrangendo as medidas de diâmetro interno, espessura, ovalização, conicidade, excentricidade, entre centro dos furos, etc. A máquina substitui, como vimos, vários

outros instrumentos utilizados até os anos 1980, por apresentar precisão muito maior e por ser capaz de dimensionar coordenadas dos eixos x, y e z.



Figura 26 – MMC tridimensional na medição da biela.

A primeira máquina de medir por coordenadas aplicada no controle de bielas, no contexto analisado, foi implantada em início dos anos 1990 e era uma máquina da fabricante alemã Zeiss. Seu software era o Calypso – CNC e sua precisão era de 0,5 microns. A medição realizada era por pontos, em que determinava os pontos exatos a serem avaliados na peça. A capacidade de medição dos eixos era, respectivamente: $x= 850$, $y= 1800$ e $z= 600$ mm.

Já o modelo utilizado desde 2007, que também é fabricado pela Zeiss, apresenta uma precisão maior, de 0,2 microns, e sua capacidade de medição por eixos é de: $x= 900$, $y= 1200$ e $z= 700$ mm. Sua medição é feita por meio de varreduras, onde a peça é analisada como em um scanner. O seu software continua sendo o Calypso – CNC, em versão atualizada.

O rugosímetro continua sendo utilizado para a verificação de controle do acabamento superficial exigido no desenho técnico da peça, pois ainda não há equipamento que o substitua nessa função.

Aplicando esses instrumentos na medição das bielas atualmente, e, especialmente com a utilização da MMC tridimensional, o tempo gasto para a análise das peças é de aproximadamente 20 minutos, o que representa um tempo nove vezes menor em comparação com o processo antigo, descrito na seção 3.1.

Através das figuras 27 e 28 podemos perceber como a medição das peças evoluiu ao longo dos anos. Ambas ilustram a medição feita antigamente e atualmente.

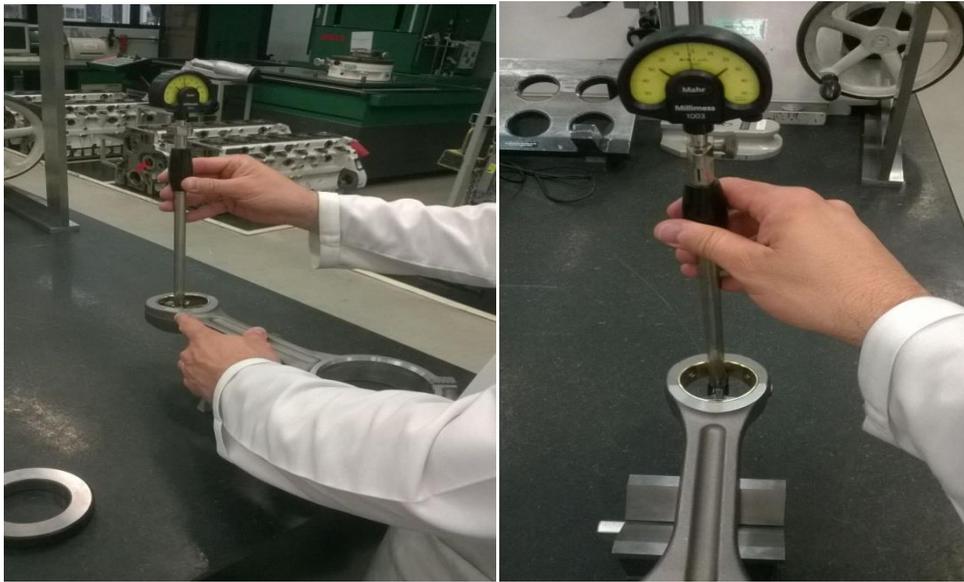


Figura 27 – Medição da biela até o final dos anos 1980.

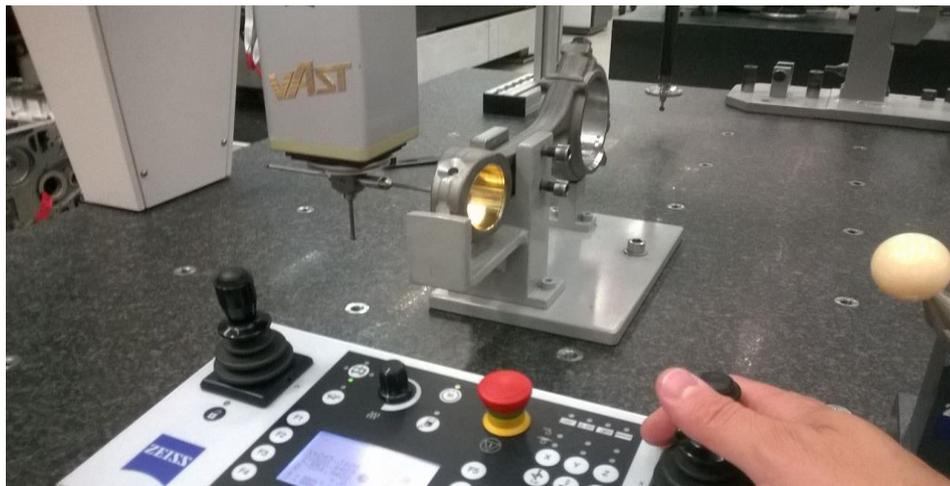


Figura 28 – Medição da biela a partir dos anos 1990.

3.3 Análise da variância entre as formas de medição da biela analisadas

Para melhor percepção dos ganhos obtidos com a aplicação da nova metodologia de medição de bielas, foram realizados experimentos estatísticos, através da tabela de análise da variância (ANOVA), a fim de obter dados de análise do diâmetro menor, diâmetro maior, entre centros e tempos em segundos.

O delineamento de experimentos foi realizado utilizando a estatística nas medições feitas antigamente e atualmente e consistiram em analisar as medições de 10 peças diferentes por 05 operadores de medição.

Todas as tabelas apresentadas utilizam as seguintes funções para a transformação dos dados obtidos:

- a) somatórios: $F(x) = \text{somatória das medições de cada operador};$
- b) médias: $F(x) = \text{média aritmética das medições de cada operador};$
- c) quadrados: $F(x) = \text{somatórios}^2;$
- d) soma dos quadrados dos elementos: $F(x) = \text{somatória do quadrado das medições de cada operador};$
- e) T^2 : $F(x) = \text{quadrado da somatória dos somatórios};$
- f) SQT: $F(x) = \text{quadrado da somatória da soma dos quadrados} - (T^2/(a*n));$
- g) SQE: $F(x) = (\text{somatória dos quadrados} - n) - (T^2/(a*n));$
- h) SQR: $F(x) = \text{soma dos quadrados dos elementos} - (\text{somatória dos quadrados}/10);$
- i) quadrados médios (entre): $F(x) = \text{SQE}/(a-1);$
- j) quadrados médios (residual): $F(x) = \text{SQR}/(a*(n-1));$
- k) F_{calc} : quadrados médios (entre) / quadrados médios (residual).

Na escolha do fator de confiabilidade não foi utilizado o índice 90% uma vez que as incertezas dos métodos de obtenção dos dados seriam maiores do que os reais assim como não foi empregado o fator 99% uma vez que as incertezas do método de obtenção dos dados seriam, neste caso, praticamente nulas, divergindo das condições reais. Sendo assim, o fator 95% de confiança é o mais adequado.

Sobre os resultados do **diâmetro menor**, medido na metodologia antiga, podem ser vistos nas tabelas 1 e 2.

Diâmetro Menor - Forma Antiga						
Peça	Operador 1	Operador 2	Operador 3	Operador 4	Operador 5	
1	52,062	52,062	52,061	52,063	52,061	
2	52,063	52,062	52,062	52,063	52,063	
3	52,062	52,061	52,063	52,062	52,064	
4	52,061	52,060	52,061	52,061	52,062	
5	52,058	52,060	52,058	52,059	52,060	
6	52,061	52,062	52,063	52,061	52,063	
7	52,060	52,059	52,062	52,061	52,058	
8	52,059	52,058	52,060	52,058	52,060	
9	52,062	52,062	52,061	52,061	52,063	Valores
10	52,064	52,063	52,063	52,064	52,062	Globais
Somatórios	520,612	520,609	520,614	520,613	520,616	2603,064
Médias	52,1	52,1	52,1	52,1	52,1	52,1
Quadrados	271036,8545	271033,7309	271038,937	271037,8958	271041,0195	1355188,438
Soma dos quadrados dos elementos	27103,68548	27103,37311	27103,89372	27103,78961	27104,10198	135518,8439

SQT =	0,00013808
-------	------------

SQE =	0,00000268
-------	------------

SQR =	0,00013540
-------	------------

SQE + SQR = SQT	0,00013808
--------------------	------------

a =	5
n =	10
T ²	6775942,188

Tabela 1 – Diâmetro menor (forma antiga).

Tabela ANOVA - Tempo - Forma antiga				
Fonte de variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrados Médios	F _{calc}
Entre	0,00000268	4	0,00000067	0,222678233
Residual	0,00013540	45	0,00000301	
Total	0,0001381	49		

Na tabela "F" com $\alpha = 5\%$; Numerador = 4; Denominador = 45, vem

F_{crit} 2,578739

Tabela 2 – Diâmetro menor – tabela ANOVA (forma antiga)

Após analisar os dados das tabelas 1 e 2, conclui-se que não se pode considerar que existam diferenças entre os operadores, pois apresentam 95% de confiança na medição.

Nas tabelas 3 e 4 veremos os resultados do **diâmetro menor**, medido na metodologia atual.

Diâmetro Menor - Forma Atual						
Peça	Operador 1	Operador 2	Operador 3	Operador 4	Operador 5	
1	52,064	52,069	52,065	52,062	52,063	
2	52,064	52,066	52,066	52,066	52,066	
3	52,063	52,063	52,069	52,065	52,065	
4	52,065	52,062	52,068	52,066	52,066	
5	52,064	52,069	52,066	52,066	52,062	
6	52,063	52,068	52,061	52,062	52,066	
7	52,061	52,066	52,060	52,062	52,062	
8	52,060	52,068	52,064	52,066	52,066	
9	52,065	52,066	52,069	52,063	52,066	Valores Globais
10	52,064	52,065	52,064	52,066	52,062	
Somatórios	520,633	520,662	520,652	520,644	520,644	2603,235
Médias	52,06	52,07	52,07	52,06	52,06	52,06
Quadrados	271058,7207	271088,9182	271078,5051	271070,1747	271070,1747	1355366,494
Soma dos quadrados dos elementos	27105,87209	27108,89188	27107,8506	27107,01751	27107,01751	135536,6496

SQT =	0,0003
-------	--------

SQE =	0,0000
-------	--------

SQR =	0,0002
-------	--------

SQE + SQR = SQT	0,0003
-----------------	--------

a =	5
n =	10
T ²	6776832,465

Tabela 3 – Diâmetro menor (forma atual).

Tabela ANOVA - Tempo - Forma atual				
Fonte de variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrados Médios	F _{calc}
Entre	0,0000	4	0,0000	2,308711964
Residual	0,0002	45	0,0000	
Total	0,0003	49		

Na tabela "F" com $\alpha = 5\%$; Numerador = 4; Denominador = 45, vem

F_{crit}
2,578739

Tabela 4 – Diâmetro menor – tabela ANOVA (forma atual)

Ao analisar as tabelas 3 e 4, pode-se considerar que existam diferenças entre os operadores, com 95% de confiança de medição.

Comparando-se os dois métodos de medição analisados no **diâmetro menor**, conclui-se que, de acordo com o teste F, de Snedecor, não existe diferença estatisticamente significativa entre os modelos apresentados.

As próximas tabelas, 5 e 6, irão apresentar os resultados do **diâmetro maior**, medido na metodologia antiga.

Diâmetro Maior - Forma Antiga						
Peça	Operador 1	Operador 2	Operador 3	Operador 4	Operador 5	
1	99,004	99,005	99,003	99,004	99,002	
2	99,005	99,002	99,004	99,004	99,003	
3	99,003	99,001	99,000	99,002	99,002	
4	98,999	99,000	99,001	99,001	99,001	
5	99,000	99,000	99,002	99,001	99,000	
6	99,001	99,003	99,003	99,000	99,005	
7	99,004	99,005	99,005	98,999	98,999	
8	98,998	98,995	98,997	99,001	99,002	
9	99,003	99,001	99,003	99,002	99,002	
10	99,006	99,002	99,003	98,999	98,998	Valores Globais
Somatórios	990,023	990,014	990,021	990,013	990,014	4950,085
Médias	99,0023	99,0014	99,0021	99,0013	99,0014	99,0017
Quadrados	980145,5405	980127,7202	980141,5804	980125,7402	980127,7202	4900668,302
Soma dos quadrados dos elementos	98014,55412	98012,77209	98014,15809	98012,57405	98012,77206	490066,8304

SQT =	0,00025850
-------	------------

SQE =	0,00000860
-------	------------

SQR =	0,00024990
-------	------------

SQE + SQR = SQT	0,00025850
--------------------	------------

a =	5
n =	10
T²	24503341,51

Tabela 5 – Diâmetro maior (forma antiga).

Tabela ANOVA - Tempo - Forma antiga				
Fonte de variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrados Médios	F _{calc}
Entre	0,00000860	4	0,00000215	0,387155217
Residual	0,00024990	45	0,00000555	
Total	0,0002585	49		

Na tabela "F" com $\alpha = 5\%$; Numerador = 4; Denominador = 45, vem

F_{crit}
2,578739

Tabela 6 – Diâmetro maior – tabela ANOVA (forma antiga)

Analisando-se os dados das tabelas 5 e 6, não se pode considerar que existam diferenças entre os operadores, apresentando 95% de confiança de medição.

As tabelas 7 e 8 demonstram os dados obtidos na forma atual de medição do **diâmetro maior**.

Diâmetro Maior - Forma Atual						
Peça	Operador 1	Operador 2	Operador 3	Operador 4	Operador 5	
1	99,012	99,018	99,015	99,007	99,004	
2	99,012	99,019	99,014	99,010	99,010	
3	99,012	99,004	99,018	99,015	99,015	
4	99,011	99,007	99,008	99,019	99,019	
5	99,009	99,011	99,010	99,019	99,007	
6	99,013	99,019	99,012	99,007	99,010	
7	99,012	99,014	99,013	99,007	99,007	
8	99,013	99,008	99,009	99,010	99,019	
9	99,013	99,010	99,018	99,004	99,010	Valores Globais
10	99,017	99,015	99,017	99,019	99,007	
Somatórios	990,124	990,125	990,134	990,117	990,108	4950,608
Médias	99,0124	99,0125	99,0134	99,0117	99,0108	99,0122
Quadrados	980345,5354	980347,5156	980365,338	980331,6737	980313,8517	4901703,914
Soma dos quadrados dos elementos	98034,55357	98034,75182	98036,53392	98033,16767	98031,38541	490170,3924

SQT =	0,000995
-------	----------

SQE =	0,000038
-------	----------

SQR =	0,000957
-------	----------

SQE + SQR = SQT	0,000995
--------------------	----------

a =	5
n =	10
T ²	24508519,57

Tabela 7 – Diâmetro maior (forma atual).

Tabela ANOVA - Tempo - Forma atual				
Fonte de variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrados Médios	F _{calc}
Entre	0,0000377	4	0,0000094	0,443417863
Residual	0,0009570	45	0,0000213	
Total	0,0009947	49		

Na tabela "F" com $\alpha = 5\%$; Numerador = 4; Denominador = 45, vem

F_{crit}
2,578739

Tabela 8 – Diâmetro maior – tabela ANOVA (forma atual)

Ao analisar as tabelas 7 e 8, não se pode considerar que existam diferenças entre os operadores, com 95% de confiança de medição.

Comparando-se os dois métodos de medição analisados no **diâmetro maior**, conclui-se que, de acordo com o teste F, de Snedecor, não existe diferença estatisticamente significativa entre os modelos apresentados.

As próximas tabelas, 9 e 10, irão apresentar os resultados do **entre centros**, medido na metodologia antiga.

Entre Centros - Forma Antiga						
Peça	Operador 1	Operador 2	Operador 3	Operador 4	Operador 5	
1	255,96	255,98	255,96	255,96	256,00	
2	255,94	255,96	255,94	256,00	255,98	
3	255,96	255,98	255,96	255,96	255,98	
4	255,96	256,02	255,98	256,00	255,94	
5	255,94	256,04	256,00	256,00	256,00	
6	255,98	256,00	256,00	255,98	255,96	
7	256,00	255,98	255,98	256,00	255,96	
8	256,02	256,00	256,02	256,98	256,00	
9	256,04	256,04	256,04	256,00	256,02	Valores
10	256,00	256,02	256,00	255,98	256,00	Globais
Somatórios	2559,80	2560,02	2559,88	2560,86	2559,84	12800,4
Médias	255,98	256,00	255,99	256,09	255,98	256,0080
Quadrados	6552576,04	6553702,4	6552985,614	6558003,94	6552780,826	32770048,82
Soma dos quadrados dos elementos	655257,6144	655370,2468	655298,5696	655801,2844	655278,088	3277005,803

SQT =	1,00000
-------	---------

SQE =	0,07880
-------	---------

SQR =	0,92120
-------	---------

SQE + SQR = SQT	1,00000
--------------------	---------

a =	5
-----	---

n =	10
-----	----

T ²	163850240,2
----------------	-------------

Tabela 9 – Entre centros (forma antiga).

Tabela ANOVA - Tempo - Forma antiga				
Fonte de variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrados Médios	F _{calc}
Entre	0,078800	4	0,019700	0,962331745
Residual	0,921200	45	0,020471	
Total	1,000000	49		

Na tabela "F" com $\alpha = 5\%$; Numerador = 4; Denominador = 45, vem

F_{crit}
2,578739

Tabela 10 – Entre centros – tabela ANOVA (forma antiga)

As tabelas 9 e 10 demonstram que não se pode considerar que existam diferenças entre os operadores, com 95% de confiança na medição **entre centros**.

As tabelas 11 e 12, a seguir, apresentam os dados de medição de **entre centros** na forma atual.

Entre Centros - Forma Atual						
Peça	Operador 1	Operador 2	Operador 3	Operador 4	Operador 5	
1	255,996	256,005	255,996	255,992	255,992	
2	256,003	255,996	256,006	256,000	256,000	
3	255,996	255,992	256,005	255,996	255,996	
4	255,991	255,992	255,990	255,996	255,996	
5	255,999	255,993	256,000	255,996	255,992	
6	255,998	256,004	255,995	255,992	256,000	
7	255,995	256,006	255,995	255,992	255,992	
8	255,995	255,990	255,999	256,000	255,996	
9	255,998	256,000	256,005	255,992	256,000	
10	256,006	255,996	256,006	255,996	255,992	Valores Globais
Somatórios	2559,977	2559,974	2559,997	2559,952	2559,956	12799,856
Médias	255,998	255,997	256,000	255,995	255,996	255,9971
Quadrados	6553482,241	6553466,881	6553584,64	6553354,242	6553374,722	32767262,73
Soma dos quadrados dos elementos	655348,2242	655346,6884	655358,4643	655335,4243	655337,4723	3276726,274

SQT =	0,001101
-------	----------

SQE =	0,000131
-------	----------

SQR =	0,000971
-------	----------

SQE + SQR = SQT	0,001101
--------------------	----------

a =	5
n =	10
T²	163836313,6

Tabela 11 – Entre centros (forma atual).

Tabela ANOVA - Tempo - Forma atual				
Fonte de variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrados Médios	F _{calc}
Entre	0,0001307	4	0,0000327	1,514674366
Residual	0,0009706	45	0,0000216	
Total	0,0011013	49		

Na tabela "F" com $\alpha = 5\%$; Numerador = 4; Denominador = 45, vem

F _{crit}
2,578739

Tabela 12 – Entre centros – tabela ANOVA (forma atual)

Ao analisar as tabelas 11 e 12, conclui-se que não se pode considerar que existam diferenças entre os operadores, com 95% de confiança de medição.

Comparando-se os dois métodos de medição analisados no **entre centros**, conclui-se que, de acordo com o teste F, de Snedecor, não existe diferença estatisticamente significativa entre os modelos apresentados.

As próximas tabelas 13 e 14, irão apresentar os resultados dos **tempos em segundos**, medido na metodologia antiga.

Tempos em segundos - Forma Antiga						
Peça	Operador 1	Operador 2	Operador 3	Operador 4	Operador 5	
1	222	216	208	202	210	
2	220	214	208	200	208	
3	221	214	206	200	208	
4	222	215	205	200	205	
5	223	212	203	201	206	
6	223	213	207	202	203	
7	221	216	205	199	205	
8	220	215	205	201	204	
9	223	212	204	188	204	
10	219	212	206	199	205	Valores Globais
Somatórios	2214,0	2139,0	2057,0	1992,0	2058,0	10460
Médias	221,4	213,9	205,7	199,2	205,8	209,20
Quadrados	4901796	4575321	4231249	3968064	4235364	21911794
Soma dos quadrados dos elementos	490198	457555	423149	396956	423580	2191438

SQT =	3206,00
-------	---------

SQE =	2947,40
-------	---------

SQR =	258,60
-------	--------

SQE + SQR = SQT	3206,00
-----------------	---------

a =	5
n =	10
T ²	109411600

Tabela 13 – Tempos em segundos (forma antiga).

Tabela ANOVA - Tempo - Forma antiga				
Fonte de variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrados Médios	F _{calc}
Entre	2947,40	4	736,850	128,222158
Residual	258,60	45	5,747	
Total	3206,00	49		

Na tabela "F" com $\alpha = 5\%$; Numerador = 4; Denominador = 45, vem

F _{crit}
2,578739

Tabela 14 – Tempos em segundos – tabela ANOVA (forma antiga)

A partir das tabelas 12 e 13, conclui-se que os tempos dos operadores têm produtividades diferentes, com 95% de confiança de medição.

As tabelas 14 e 15, a seguir, irão demonstrar os resultados de **tempos em segundos** medidos na forma atual.

Tempo em segundos - Forma Atual						
Peça	Operador 1	Operador 2	Operador 3	Operador 4	Operador 5	
1	132	132	132	132	132	
2	132	132	132	132	132	
3	132	132	132	132	132	
4	132	132	132	132	132	
5	132	132	132	132	132	
6	132	132	132	132	132	
7	132	132	132	132	132	
8	132	132	132	132	132	
9	132	132	132	132	132	
10	132	132	132	132	132	
Somatórios	1320	1320	1320	1320	1320	6600
Médias	132	132	132	132	132	132
Quadrados	1742400	1742400	1742400	1742400	1742400	8712000
Soma dos quadrados dos elementos	174240	174240	174240	174240	174240	871200

SQT =	0,0000
-------	--------

SQE =	0,0000
-------	--------

SQR =	0,0000
-------	--------

SQE + SQR = SQT	0,0000
-----------------	--------

a =	5
n =	10
T ²	43560000

Tabela 15 – Tempos em segundos (forma atual).

Tabela ANOVA - Tempo - Forma atual				
Fonte de variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrados Médios	F _{calc}
Entre	0,00000	4	0,0000	0,00
Residual	0,00000	45	0,0000	
Total	0,00000	49		

Na tabela "F" com $\alpha = 5\%$; Numerador = 4; Denominador = 45, vem

F _{crit}
0,00

Tabela 16 – Tempos em segundos – tabela ANOVA (forma atual)

Analisando-se as tabelas 15 e 16, conclui-se que não existe variação na forma atual de medição de tempo.

Comparando-se os dois métodos de medição analisados para os **tempos em segundos**, conclui-se que existem diferenças estatisticamente significativas entre os modelos apresentados.

Assim, de forma geral, pode-se concluir que ambos os métodos de medição (antigo e atual) não apresentaram grandes variações nos resultados da medição. Entretanto, o tempo gasto na medição das bielas pela forma atual é significante menor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com os avanços tecnológicos ocorridos ao longo dos anos, foi observada a redução do tempo gasto no controle dimensional das bielas.

Até 1980, o controle dimensional de bielas fabricadas era realizado com o uso de diversos instrumentos e dispositivos de medição, tais como o súbito para comparar os diâmetros internos, o micrômetro externo milesimal para o dimensionamento da espessura e o relógio apalpador universal para a verificação da simetria das peças. Esse processo contava com uma amostragem diária de peças selecionadas para verificação, que passavam, primeiramente, por um controle funcional feito com calibradores passa-ou-não-passa, paquímetros e outros dispositivos. O controle levava em torno de três horas por peça para ser realizado e, após isso, as mesmas eram enviadas à sala de medidas. Ao final da medição, gerava-se um relatório que consolidava as medidas verificadas.

A partir de 1990, esse processo tornou-se mais simples. As bielas fabricadas passaram a ter o seu controle dimensional realizado por instrumentos de medição como a máquina de medir por coordenadas (MMC) tridimensional e rugosímetro. A biela fabricada com a tecnologia *FormBohung* ainda conta com um controle realizado através de um sistema de varredura de alta precisão, em milésimos de milímetros.

Com base nisso, pode-se perceber uma diminuição na quantidade de instrumentos necessários para medir; o tempo gasto para a análise das peças também foi reduzido, passando a ser apenas 20 minutos, um tempo nove vezes menor comparado ao processo antigo; e, ao mesmo tempo, uma precisão maior nas medições, visto que foram produzidas máquinas que analisam a peça como em um *scanner*, com uma capacidade de medição por eixos de $x = 900$, $y = 1200$ e $z = 700$ mm e uma precisão de $0,2\mu$.

Pelos dados demonstrados nas tabelas de variância (ANOVA), usando a regra da decisão, vimos que não se podem considerar diferenças entre a forma antiga e a forma atual para medição do diâmetro maior, diâmetro menor e entre centros, com 95% de confiança na medição. Porém, para a medição de tempo houve diferenças entre os modelos apresentados, sendo que a forma atual não apresenta variação de tempo. Estatisticamente, entre os dois modelos existem diferenças significativas de variabilidade.

Assim, apesar da precisão desses novos equipamentos de medição ser maior, ainda não há uma variação significativa comparada aos processos de medição anteriores, como comprovado estatisticamente.

5 CONCLUSÃO

Essa pesquisa mostra que a metrologia desempenha um importante papel, pois possibilita uma medição correta, resultando em peças de maior qualidade.

Da mesma maneira, no processo de fabricação da biela, peça responsável pela transmissão da potência no motor, a metrologia oferece condições de controle dimensional adequado para garantir a confiabilidade do produto e identificar pontos de futuras melhorias.

Ainda foi possível observar que este controle vem sendo modificado e aperfeiçoado ao longo dos anos, pois o modelo de biela fabricado até os anos 1980 contava com um controle dimensional realizado por meio do uso de traçador de altura, montado com relógio apalpador milesimal, micrômetro externo, súbito, rugosímetro, centri-meter, eixo cônico retificado, entre-pontas e calço regulável de altura. A evolução tecnológica possibilitou um controle mais simples executado através de máquinas de medir por coordenadas (MMC) tridimensional e o rugosímetro. Esse conjunto de equipamentos apresenta uma precisão maior, pois dimensiona as coordenadas do eixo x, y e z, abrangendo medidas de diâmetro interno, espessura, ovalização, conicidade, excentricidade, entre outras verificações, que não eram possíveis de se obter da maneira tradicional.

Para analisar as diferenças ocorridas na medição no período destacado, foi realizado um levantamento estatístico com os dados coletados no controle dimensional das bielas.

Com base nas análises de variância, foi possível concluir que o ganho real está relacionado ao tempo de medição. Comparado com a forma antiga, observou-se uma redução no tempo de medição igual a 78 segundos, que representa 37,14% do tempo original.

Com relação à precisão das medições, não foram observadas mudanças significativas, pois, nas duas formas estudadas, foi observada uma confiança de 95% nas leituras.

Como sugestão para trabalhos futuros, propõe-se analisar a aplicação da nova tecnologia de medição óptica de peças, para comparação com o processo desenvolvido atualmente, a fim de determinar se haveriam ganhos de precisão, tempo e redução custos no controle dimensional de bielas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFZAL, A. **Fatigue behavior and life predictions of forged steel and powder metal connecting rods.**2004. 263 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Toledo, Toledo, 2004.

AGUIAR NETO, R. R. **Estatística básica aplicada à administração judiciária.** 2009. 136 f. Dissertação (Mestrado em Poder Judiciário) – Fundação Getúlio Vargas, Rio de Janeiro, 2009. Disponível em: <<http://bibliotecadigital.fgv.br/dspace/bitstream/handle/10438/4221/DMPPJ%20-%20RUY%20ROSADO%20DE%20AGUIAR%20NETO.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 24 nov. 2016.

ALBERTAZZI, A.; SOUSA, A.R. de. **Fundamentos de metrologia: científica e industrial.** Barueri: Manole, 2015.

BOSCH, R. **Manual de tecnologia automotiva.** São Paulo: Edgard Blucher, 2005. 1232 p.

CENTRO TÉCNICA. **Árvore de manivela (virabrequim)** Disponível em: <<http://www.centrotecnica.com.br/produto?id=45>>. Acesso em: 03out. 2016.

COELHO, T. **Classificação de produto em linha de processos de fabricação de bielas utilizando recursos da automação.** 2014. 92 f. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Diplomação, Curso Superior de Tecnologia em Automação Industrial, Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2014. Disponível em: <http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/2358/1/CT_COALT_2013_2_09.pdf>. Acesso em: 03 set. 2015.

CON-ROD should boost engine performance. **Professional Engineering, Technology**, p. 60, 2003. Disponível na base Ebsco Publishing.

CRESPO, A. A. **Estatística fácil.** São Paulo: Saraiva, 2011.

CUMMINS. **ISBe 6.**c2016. Disponível em: <<http://www.cummins.com.br/produtos/motores/mid-range-18-380-hp/isbe-6>>. Acesso em: 03 out. 2016.

FERNANDES, W.D.; COSTA NETO, P. L. O.; SILVA, J. R. da. Metrologia e qualidade: sua importância como fatores de competitividade nos processos produtivos. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 29., 2009, Salvador. **Anais...** Salvador: ABEPRO, 2009, p. 1-12. Disponível em: <http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2009_TN_STO_091_615_13247.pdf>. Acesso em: 11 abr. 2016.

GU, Z. et al. Fracture splitting technology of automobile engine connecting rod. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, n. 25, p. 883-887, 02 fev. 2005.

HEXAGON METROLOGY. **TESA Micro-Hite 3D passa a ser “finamizável”**. 2 set. 2011. Disponível em: <http://www.hexagonmetrology.com.br/Novidades_86.htm?id=3270#.Vx9_xvkrKUK>. Acesso em: 11 abr. 2016.

HUSKONEN, W. Collaboration optimizes con-rod manufacturing: development work by Corus and a British forger leads to significant weight reduction opportunities and improved machining of connecting rods. **Forging Magazine**, 01 jun. 2006. Disponível em: <<http://forgingmagazine.com/feature/collaborationoptimizesconrodmanufacturing>>. Acesso em: 28 nov. 2015.

KHARE, S. et al. Spalling investigation of connecting rod. **Engineering Failure Analysis**, v. 19, p. 77-86, 2012. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350630711002226>>. Acesso em: 20jan. 2016.

LARSON, R.; FARBER, B. **Estatística aplicada**. 4. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2013.

LIRA, F. A. de. **Metrologia na Indústria**. 9.ed. São Paulo: Érica, 2014.

LOUREIRO, T. W. **Análise paramétrica do conjunto pistão, biela e árvore de manivelas com foco na redução de perdas por atrito e de consumo de combustível**. 2009. 218 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Mestrado Profissional em Engenharia Automotiva) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009. Disponível em: <<http://www.automotiva-poliusp.org.br/wp-content/uploads/2013/08/Loureiro-Thiago-Wilhelmsen.pdf>>. Acesso em: 03 set. 2015.

MAAS, G. A. **A tecnologia de medição por coordenadas na solução de problemas da indústria**: sistematização de informações e do processo metrológico do laboratório prestador de serviços. 2001. 103 f. Dissertação (Mestrado em Metrologia) – Curso de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/81640>>. Acesso em: 23 set. 2015.

MARTINS, V. A. C. M.; GARCIA, E. C. Estudos sobre motores diesel. In: ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E PÓS-GRADUAÇÃO DO ITA - ENCITA, 16., 2010, São José dos Campos. **Anais...** São José dos Campos: Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2010. Disponível em: <<http://www.bibl.ita.br/xviencita/>>. Acesso em: 03 set. 2015.

MILAGRE, R. A. **Estatística**: uma proposta de ensino para os cursos de administração de empresas. 2001. 160 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de

Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

Disponível em:

<<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/81812/186310.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 24 nov. 2016.

MITUTOYO. **Instrumentos para metrologia dimensional**: utilização, manutenção e cuidados. São Paulo: Mitutoyo, 2003.

NEVES, G. F. G. S. **Análise cinemática, dinâmica, de vibração e de tensão em motores de combustão interna com virabrequim e bielas flexíveis**. 2010. 167 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=000772604>>. Acesso em: 03 set. 2015.

PARETO, L. **A técnica da ajustagem**. [S. l.]: Hemus, 2003.

PORTAL AUTO. **O que é biela?** 15 fev. 2016. Disponível em:

<<http://portalauto.com.br/manutencao/biela/>>. Acesso em: 03 out. 2016.

POWDER-FORGED connecting rod optimized for cost, performance. *Advanced Materials & Processes*, v. 163, n. 9, p. 56-57, set. 2005. Disponível em:

<<http://connection.ebscohost.com/c/articles/18216632/powder-forged-connecting-rod-optimized-cost-performance>>. Acesso em: 03 set. 2015.

SILVA, E. S. et al. Projeto e desenvolvimento de uma máquina de medição por coordenadas automatizada. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 20., 2014, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte, 2014. Disponível em:

<<http://www.swge.inf.br/CBA2014/anais/PDF/1569935645.pdf>>. Acesso em: 11 abr. 2016.

SILVA, R. A. R. da. **Modelagem e simulação do mecanismo biela manivela e análise estrutural de biela automotiva**. 2013. 57 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia de

Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Guaratinguetá, 2013. Disponível em:

<<http://repositorio.unesp.br/handle/11449/121264>>. Acesso em: 03 set. 2015.

SILVA NETO, J. C. da. **Metrologia e controle dimensional**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

SOUZA, R. **Funcionamento do motor**. 30 mar. 2014. Disponível em:

<<http://pt.slideshare.net/romvin/03-funcionamento-do-motor>>. Acesso em: 11 abr. 2016.

TANAKA, M. C. **Avaliação de um dispositivo utilizado em máquina de medir por coordenadas**. 2009. 81 p. Monografia (Graduação em Engenharia de Petróleo) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2009. Disponível em:

<http://www.nupeg.ufrn.br/documentos_finais/monografias_de_graduacao/marcelotana.naka.pdf>. Acesso em: 11 abr. 2016.

VARELLA, C. A. A.; SANTOS, G. S. **Noções básicas de motores diesel**. Seropédica: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <http://www.ufrj.br/institutos/it/deng/varella/Downloads/IT154_motores_e_tratores/Literatura/No%E7%F5es%20B%E1sicas%20de%20Motores%20Diesel.pdf>. Acesso em: 05 out. 2016.

WERNER, H. **Projeto de melhorias do processo de máquinas de medição por coordenadas**. 2013. 59 f. Trabalho (Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas) – Departamento de Engenharia de Produção e Sistemas, Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2013. Disponível em: <<http://www.producao.joinville.udesc.br/tgeps/tgeps/2013-2/Heitor%20Werner.pdf>>. Acesso em: 11 abr. 2016.