

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO

ESTUDO PARA DESENVOLVIMENTO DE UM NOVO
CONCEITO DE EXTENSÔMETROS IMPRESSO

ANTONIO WESLEY CARVALHO DE OLIVEIRA

Manaus
2010

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO

ANTONIO WESLEY CARVALHO DE OLIVEIRA

ESTUDO PARA DESENVOLVIMENTO DE UM NOVO
CONCEITO DE EXTENSÔMETROS IMPRESSO

Dissertação apresentada ao Programa de Engenharia de Produção, da Faculdade e Tecnologia da Universidade Federal do Amazonas, como requisito necessário para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de produção.

Orientador: Dr. João Morais da Silva Neto

Co-orientador: Msc. Renato Bonadiman

Co-orientador: Msc. Jairo Alonso Quinteiro Quinteiro

Manaus
2010

Ficha Catalográfica
(Catalogação realizada pela Biblioteca Central da UFAM)

Oliveira, Antonio Wesley Carvalho de

2.1 O48 Estudo para desenvolvimento de um novo conceito de extensômetros impressos / Antonio Wesley Carvalho de Oliveira. - Manaus: UFAM, 2009.
50 f.; il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) — Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2009.

Orientador: Dr. João Morais da Silva Neto

Co-orientador: MSc. Renato Bonadiman

Co-orientador: MSc. Jairo Alonso Quinteiro Quinteiro

1. Produtos novos - Desenvolvimento 2. Extensômetro 3. Nano-partículas I. Silva Neto, João Morais (Orient.) II. Bonadiman, Renato (Co-orient.) III. Quinteiro, Jairo Alonso Quinteiro (Co-orient.) IV. Universidade Federal do Amazonas V. Título

CDU (2007): 658.624(043.3)

ANTONIO WESLEY CARVALHO DE OLIVEIRA

ESTUDO PARA DESENVOLVIMENTO DE UM NOVO CONCEITO DE
EXTENSÔMETROS IMPRESS

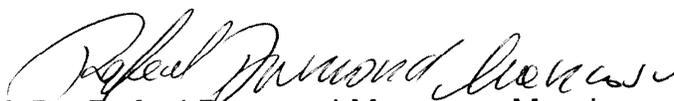
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Amazonas, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção, área de concentração Gestão da Produção.

Aprovada em 28 de janeiro de 2010.

BANCA EXAMINADORA


Prof. Dr. João Morais da Silva Neto, Presidente.
Instituto Nokia de Tecnologia


Prof. Dr. Waltair Vieira Machado, Membro
Universidade Federal do Amazonas


Prof. Dr. Rafael Drumond Mancosu, Membro
Instituto Nokia de Tecnologia

Aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

À Deus.

Ao Doutor João Morais da Silva Neto pelo seu empenho, orientação e conselho no sentido de desenvolver este trabalho.

Aos co-orientadores Renato Bonadiman, Jairo Alonso Quintero Quintero, e Idécio Cardoso pelo apoio e acompanhamento deste trabalho.

A Doutora. Ocicleide Silva pelo empenho, dedicação, paciência e concretização do programa de mestrado.

Ao Instituto Nokia de Tecnologia por disponibilizar os equipamentos para realização deste trabalho.

Aos considerados do grupo do curso de mestrado, em especial Ângelo, Dani Rolim, Erik Maciel, Gilbert e Leandro Pato.

A todos os que tornaram, direta e indiretamente, possível a execução deste trabalho.

*“O, what men dare do! What men may do!
What men daily do, not knowing what they do.”*
– Shakespeare, “Much Ado About Nothing”

RESUMO

O processo de desenvolvimento de novos produtos dividi-se basicamente em cinco etapas: identificação de oportunidade e desenvolvimento do conceito, planejamento e especificação do produto, desenvolvimento e processo de engenharia do produto, teste e avaliação, e início da produção. A etapa de teste permite assegurar que o novo produto é confiável e está de acordo com as necessidades do cliente. Nesta etapa, a engenharia avalia se o produto está conforme por meio de ferramentas experimentais. Uma destas ferramentas é o transdutor comumente utilizado para medir deformações conhecido como extensômetro. Embora os extensômetros apresentem ampla aplicação, a utilização da cola para fixação na superfície do corpo pode comprometer os resultados de uma medição. Uma proposta para os problemas relacionados à fixação do extensômetro é imprimir o extensômetro na superfície do corpo a ser analisado por meio de impressão de tintas que utilizam nanopartículas metálicas. O processo de impressão consiste em depositar gotas de suspensão extremamente finas na superfície de um corpo flexível polimérico. Como objetivo, este trabalho avaliou a performance do extensômetro impresso, obtido por meio de impressão de tinta condutiva de prata, sobre a superfície de um material flexível. Para isso, descrevem-se as características do extensômetro convencional e do extensômetro impresso, aplica-se o extensômetro convencional e o impresso na superfície de um material polimérico flexível por meio dos métodos convencionais de fixação e impressão de nano-partículas condutivas respectivamente, comparam-se as características e medições dos extensômetros convencional e impresso por meio de ensaios mecânico: de tração e flexão, e avaliam-se as vantagens e desvantagens do extensômetro impresso. Os resultados obtidos pelo novo conceito de extensômetro apresentaram-se bastante satisfatórios nas avaliações experimentais.

Palavras-chave: Desenvolvimento de novos produtos; Extensômetro; Nano-partículas.

ABSTRACT

The process of new product development is split-up basically in five stages: identification of opportunity and concept development, planning and product specification, development and engineering process of the product, testing and evaluations, and ram-up. The testing stage allows guaranteeing that the new product is reliable and is in accordance with customer needs. In this phase, the engineering group checks if the product is conform through experimental tools. One of these tools is the sensor generally used to measure deformation known as strain gauge. Although the strain gauges have large application, the usage of very strong quick-setting adhesive to fix the strain gauge on the body can compromise the results of the measurement. A proposal to cover the problems related to the placement of the strain gauge is to print the strain gauge on the surface of the body to be analyzed through of printing method of ink that has metal nanoparticles. The printing process consists in to deposit drops of suspension extremely thin onto the surface of a flexible polymer film. As objective, this work evaluated the performance of the printed strain gauge, obtained by silver conductive ink, above surface of flexible material. Thereunto, it was described the characteristics of the conventional strain gauge and printed strain gauge, apply the strain gauge conventional and printed on the surface of an flexible polymeric material through conventional placement methods and ink-jet print methods, compare the characteristics and measurement of strain gauge conventional and printed by mechanical tests: tensile strength and flexural, and evaluate the advantage and disadvantage of the printed strain gauge. The results obtained by the new concept of strain gauge presented very satisfactory by the experimental tests.

Keywords: New product development; Strain gauge; Nanoparticles.

LISTA DE FIGURA

Figura 2.1 – Etapas sumárias do processo de desenvolvimento de novo produto....	17
Figura 2.2 - Modelos de desenvolvimento de novos produtos.	18
Figura 2.3 – Corpo de prova cilíndrico típico de ensaio de tração. (a) amostra não-deformada: comprimento $L = 50$, diâmetro = D ; (b) amostra deformada: comprimento alongado $L = 50 + e$	20
Figura 2.4 – Corpo de prova submetido à flexão de três pontos.	21
Figura 2.5 – Representação das partes de um extensômetro simples.	23
Figura 2.6 – Modelos de extensômetros unidirecionais segundo fabricante Excel sensores.	23
Figura 2.7 – Esquema de identificação utilizado nos extensômetros do fabricante Kyowa.	24
Figura 2.8 – Seção transversal de um fio.	25
Figura 2.9 - Seção transversal em um fio sob o efeito de carga (F).	26
Figura 2.10 – Representação de um circuito elétrico simples.	28
Figura 2.11 – Ponte de Wheatstone – $\frac{1}{4}$ da ponte ativa com strain gauge.	29
Figura 2.12 – Impressora a jato de tinta para impressão de nano-partículas.	32
Figura 3.1 – Extensômetro impresso na superfície do filme polimérico.	34
Figura 3.2 – Filme de polyamide com extensômetro impresso entre garras para a avaliação do fator de sensibilidade	36
Figura 3.3 – Diagrama do sistema de medição para medição de deformação do ensaio de tração através dos extensômetros	37

Figura 3.4 – Diagrama do sistema de medição para medição de deformação do ensaio de flexão através dos extensômetros.	38
Figura 3.5 – Diagrama tensão-deformação do filme polimérico Polyamide DuPont..	39
Figura 4.1 – Sensibilidade (K) à deformação do extensômetro convencional obtido por meio experimental.	41
Figura 4.2 – Sensibilidade (K) à deformação do extensômetro impresso obtido por meio experimental.	42
Figura 4.3 – Comparação de sensibilidades (fator K) entre o extensômetro impresso e o convencional.	43
Figura 4.4 – Amostra de polyamide com extensômetro impresso sob teste de tração	44
Figura 4.5 – Resultado do teste de tração óbito por meio do extensômetro impresso e convencional	45
Figura 4.6 – Amostra de polyamide com extensômetro impresso sob teste de flexão.	46
Figura 4.7 – Amostra de polyamide com extensômetro impresso sob teste de tração	46

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 2.1 - Resistividade do fio	25
Equação 2.2 - Variação na resistência elétrica do fio.....	26
Equação 2.3 - Variação na resistência elétrica do fio expandida	26
Equação 2.5 - Deformação radial (ϵ_r)	27
Equação 2.6 - Deformação axial (ϵ_x).....	27
Equação 2.7 - Coeficiente de <i>Poisson</i> (ν)	27
Equação 2.10 - Sensibilidade do extensômetro	27
Equação 2.11 - Diferença de potencial.....	28
Equação 2.12 - Variação na resistência no extensômetro	28
Equação 2.13 - Variação na resistência no extensômetro	28
Equação 2.14 - Máxima sensibilidade do circuito.....	29

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	13
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1 Desenvolvimento de novos produtos	16
2.1.1 Conceito de novo produto.....	16
2.1.2 Fases do desenvolvimento de um novo produto.....	17
2.1.3 Generalidades dos testes do novo produto.....	19
2.1.3.1 <i>Ensaio de tração</i>	19
2.1.3.2 <i>Ensaio de flexão</i>	20
2.2 Princípios básicos da extensometria	21
2.2.1 Extensômetros	21
2.2.2 Propriedade dos extensômetros	22
2.2.3 Fixação do extensômetro na peça	24
2.2.4 Características elétricas dos extensômetros.....	25
2.2.5 Influência do fator de sensibilidade (K)	27
2.2.6 Ponte de Wheaststone.....	29
2.2.7 Unidade da deformação.....	31
2.2.8 Vantagens e desvantagens.....	30
2.3 Tecnologia de impressão a jato de tinta de nano-materiais	30
2.3.1 Nano-partículas de prata pra impressão a jato de tinta	31
2.3.2 Variáveis do processo de impressão	31

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL PROPOSTO PARA VALIAÇÃO DO NOVO MODELO DE EXTENSOMETRO.....	33
3.1 Tipo de pesquisa.....	33
3.2 Método experimental para coleta dos dados	33
3.2.1 Características do extensometro convencional.....	34
3.2.2 Características do extensometro impresso	35
3.2.3 Ensaio de tração	36
3.2.4 Ensaio de flexão	37
3.3 Tratamento dos dados	38
3.4 Limitações dos sensores	38
4 RESULTADOS E DICUSSÕES	40
4.1 Análise de sensibilidade (K) de cada extensômetro.....	40
4.2 Medições para o ensaio de tração.....	44
4.3 Medições para o ensaio de flexão	45
5 CONCLUSÃO	47
REFERÊNCIAS	48

INTRODUÇÃO

O conceito de novo produto é bastante amplo e subjetivo. Novos produtos podem ser produtos realmente novos para o mercado ou produtos que já existem no mercado mas que a organização está lançando agora.

Ao considerar a possibilidade de desenvolver novos produtos as organizações devem superar etapas como: geração e seleção da idéia, desenvolvimento do produto, testes e avaliações e início da produção.

Dentro deste contexto, observa-se uma etapa não mais importante que as demais, mas de grande importância para garantir a confiabilidade do novo produto. A etapa de testes permite não apenas checar se as especificações estão de acordo com as necessidades do cliente, mas também assegurar que o produto é confiável e com qualidade.

Com o passar do tempo, indústrias de produtos eletrônicos tais como fabricantes de câmera fotográfica, tocadores de música e telefonia celular contrastam com duas tendências: minituarização e o aumento das funções.

Neste momento, a engenharia utiliza-se de inúmeras ferramentas que possibilitam investigar a performance desses produtos, e uma dessas ferramentas freqüentemente usada é o extensômetro.

Extensômetros são dispositivos eletrônicos com tecnologia amplamente difundida e uso consolidado na engenharia. Estes dispositivos permitem mensurar deformações de um corpo quando submetido a esforços mecânicos ou efeitos térmicos. O tipo mais comum de extensômetro é composto por um fio fino condutivo, com diâmetro entre 13 e 25 μm , fixado em uma base de papel ou plástico em forma de grade.

A primeira proposta física deste tipo de transdutor foi desenvolvida pelos cientistas americanos Edward Simmons e Arthur Ruge, e consistia de um longo fio colado na superfície do corpo em análise.

Atualmente, o processo de fabricação dos transdutores adotou o método de manufatura de folhas ou laminas contendo um labirinto ou grade metálica, colado em uma base flexível geralmente feita de material polimérico.

Podem ser citadas como principais características dos extensômetros a precisão de medição, dimensão pequena e pouco peso, boas respostas aos eventos dinâmicos, fácil utilização, possibilidade de medições em locais remotos, entre outros.

A aplicação do extensômetro sobre a superfície do corpo em análise é a parte mais crítica e pode comprometer completamente a medição. Tanto a superfície do corpo quanto a superfície do extensômetro devem estar absolutamente limpas para que a qualidade da adesão não seja comprometida.

Um dos principais fatores que afetam a performance e o emprego dos extensômetros é o material pela qual o condutor é feito. Idealmente o condutor deve ter um elevado fator de sensibilidade, geralmente expressado pelo símbolo K . Este fator indica que a mudança relativa na resistência é proporcional a magnitude da deformação medida, de forma que pequenas e grandes deformações possam ser monitoradas. A resistência específica do material deve ser também alta, para sofrer grandes mudanças na resistência quando deformado.

Embora os extensômetros apresentem ampla aplicação, a utilização da cola para fixação na superfície do corpo pode comprometer os resultados de uma medição. Estas colas são de Cianocrilato (CA), comercialmente conhecidas como *Superbond*, *Three Bond*, M-200 e *Scotch Bond* 3M. Apresentam como principal característica cura em pouco tempo, de 10 a 30 segundos, e quando curada tornam-se relativamente rígidas. Em corpos que tem característica similares as das membranas e filmes, ou seja, corpos com baixa rigidez e pequena espessura a rigidez da cola influência pode afetar o resultado da medição.

Uma proposta para os problemas relacionados à fixação do extensômetro, área de medição, e sensibilidade é imprimir o extensômetro na superfície do corpo a ser analisado por meio de impressão de tintas que utilizam nanopartículas metálicas.

Materiais nano-estruturados são utilizados para aplicações industriais, estes materiais podem ser sintetizados em baixas temperaturas e processados em diferentes formas e maneiras, melhorando o desempenho e permitindo que se trabalhe à temperatura ambiente. O processo de impressão consiste em depositar

gotas de suspensão extremamente finas com diâmetro de aproximadamente 10 μm na superfície de um corpo.

Como objetivo geral, este trabalho pretende avaliar a performance de um novo extensômetro, obtido por meio de impressão de tinta condutiva, sobre a superfície de um material flexível.

Para que o objetivo geral fosse atingido, houve a necessidade de delinear alguns objetivos específicos como: relatar as características do extensômetro convencional e do extensômetro impresso; aplicar o extensômetro convencional e o impresso na superfície de um material polimérico flexível através dos métodos convencionais de fixação e impressão de nano-partículas condutivas respectivamente; comparar as características e medições dos extensômetros convencional e impresso por meio de ensaios mecânico: de tração e flexão; avaliar as vantagens e desvantagens do extensômetro impresso.

No que diz respeito à natureza da pesquisa, consistiu em uma pesquisa experimental aplicada, pois objetiva gerar conhecimentos para aplicação prática dirigida à solução para as limitações encontradas no uso do extensômetro convencional. Quanto à forma de abordagem, o estudo é do tipo quantitativo uma vez que, foram avaliados dados obtidos por experimentos.

A pesquisa apresentará além da parte introdutória que aborda o início do assunto tratado, a relevância da pesquisa, sua justificativa, a questão problemática e os objetivos, a seguinte estrutura:

No Capítulo 2, apresenta-se uma revisão bibliográfica dos principais assuntos abordados, visando conceder um suporte teórico no desenvolvimento do trabalho e agregar valor aos resultados. São discutidos os seguintes temas: desenvolvimento de produto, extensometria, generalidades dos ensaios mecânicos e materiais nano-estruturados.

No Capítulo 3 é descrito a metodologia seguida para a realização das avaliações experimentais utilizando o extensômetro convencional e o impresso.

No Capítulo 4 é feita a análise dos resultados obtidos com o novo modelo de extensômetro, através de comparação de dados com o extensômetro convencional descreve-se vantagens e desvantagens do extensômetro impresso.

Para finalizar apresentam-se as principais conclusões e sugestões para prosseguimento deste trabalho, e por final apontam-se as referências utilizadas no decorrer do mesmo.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo tem por objetivo informar sobre os conceitos de novos produtos e suas respectivas etapas durante o desenvolvimento. Abordam-se também a importância da etapa de teste bem com os conceitos de extensometria e as técnicas de impressão de nano-partículas pelo método a jato de tinta.

3.1 Desenvolvimento de novos produtos

Segundo Churchill (2003, pg. 234) um produto, de acordo com o mercado, são bens ou serviços, marcas e outras características que agregam valor ao cliente. Neste contexto produto é qualquer objeto, tangível (bens) ou intangível (serviços) que possa ser objeto de troca entre consumidores e organizações.

No entanto, Kotler (2000, pg. 416) afirma que um produto é algo que pode ser oferecido para satisfazer a necessidade ou desejo de consumidores. Os produtos comercializados incluem bens físicos, serviços, experiências, eventos, pessoas, lugares, propriedades, organizações, informações e idéias.

3.1.1 Conceito de novo produto

Segundo Nunes (2004, pg. 11), um novo produto pode definir-se desde a perspectiva do cliente ou da empresa, o que origina conceitos diferentes.

Para Churchill (2003, pg. 262) existem inúmeros meios de se classificar novos produtos; e para organizações, são classificadas as seguintes categorias: Produtos novos para o mundo: invenções que não existiam anteriormente; Novas categorias de produtos: produtos novos para uma empresa, mas não novas invenções; Adições a linhas de produtos: são extensões da linha de um determinado produto; Melhorias em produtos: são produtos novos à medida que representam versões alteradas de

produtos já existentes; Reposicionamento: são produtos reposicionados para novos usos ou novos mercados.

3.1.2 Fases do desenvolvimento de um novo produto

Segundo Slack, Chambers e Johnston (2002, pg. 28), as idéias para a geração do conceito de um novo produto vêm de duas origens distintas. Fontes externas, que são os consumidores ou concorrentes; e fontes internas, que são o departamento de pesquisa e desenvolvimento, sugestões do pessoal de contato com os clientes e a própria análise das necessidades do mercado consumidor. Uma vez captadas as idéias, estas precisam ser transformadas em conceitos, indicando sua forma, função, objetivo e benefícios globais, tornando-as passíveis de avaliação e operacionalização pela organização. O modelo proposto por Slack, Chambers e Johnston (2002, pg. 28) é estruturado conforme mostra a Figura 3.1.

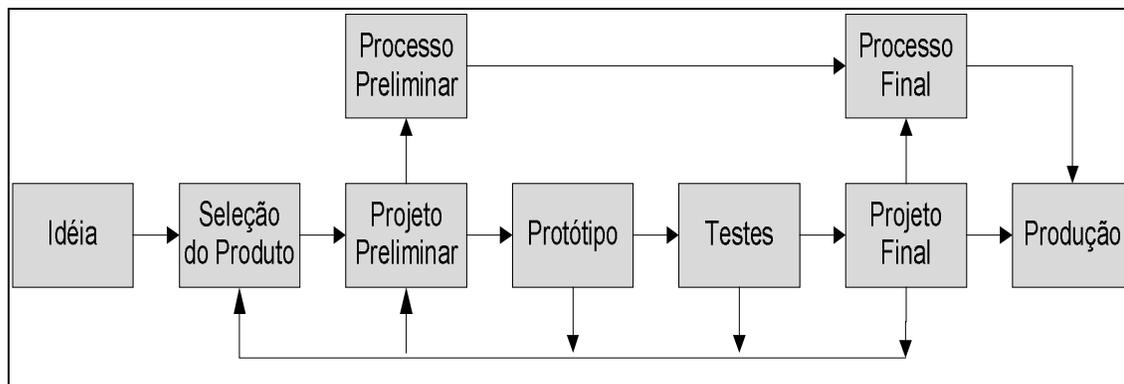


Figura 3.1 – Etapas sumárias do processo de desenvolvimento de um novo produto

Fonte: Administração da produção (Slack, Chambers e Johnston2002)

A engenharia do produto possibilita à reavaliação e criação de produtos viabilizando melhorias e constantes transformações. Embora não exista uma metodologia exata para cada tipo produto, existem algumas etapas bem definidas no desenvolvimento do projeto de um novo produto. Nunes (2004, pg. 61) descreve na Figura 3.2 quatro modelos que se consideram representativos das diversas metodologias realizadas com seus respectivos criadores, devendo considerar-se que cada etapa proposta implica uma grande complexidade e que se produzem interações entre as mesmas

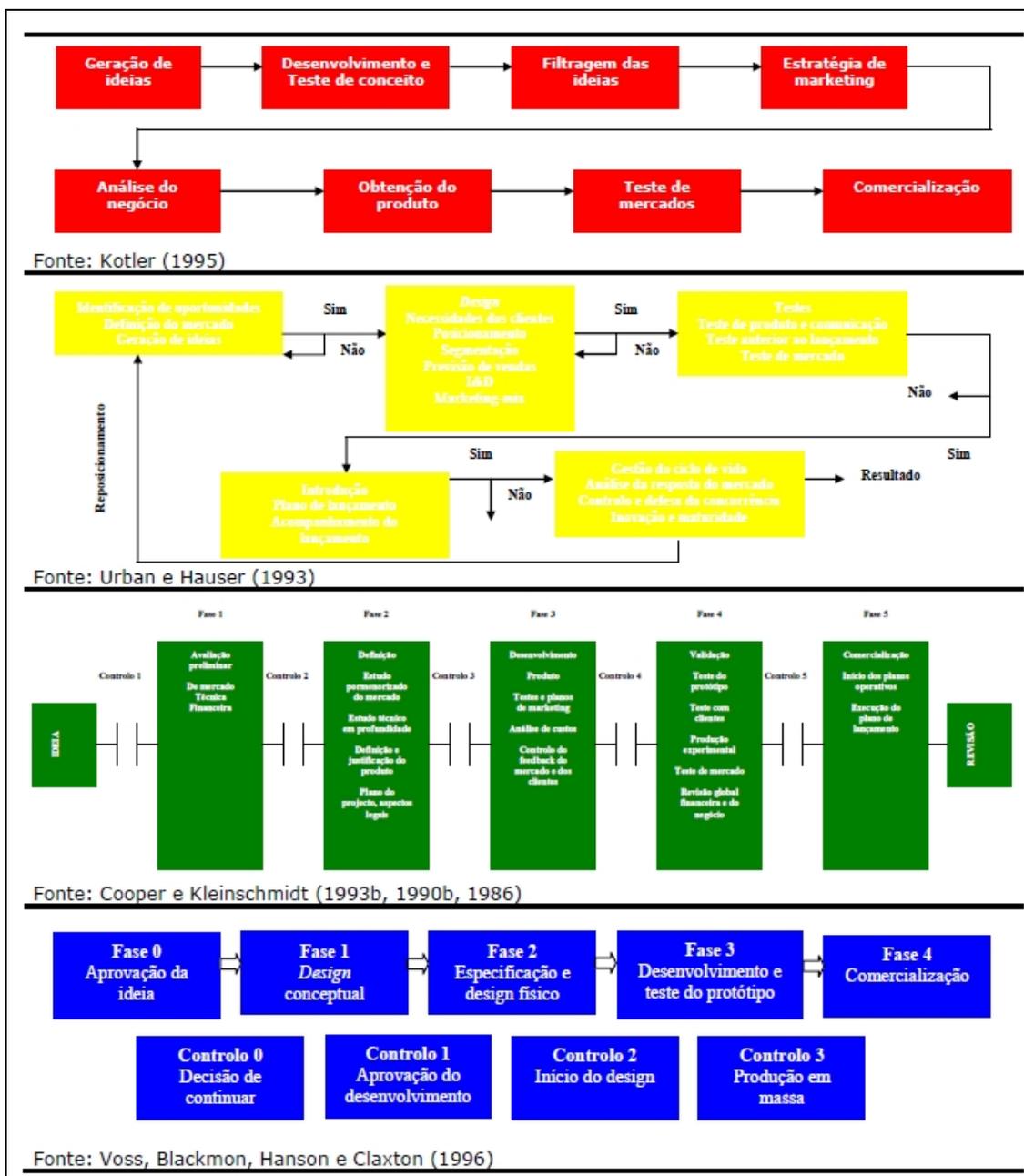


Figura 3.2 - Modelos de desenvolvimento de novos produtos.

Fonte: Metodologias de desenvolvimento de novos produtos industriais (Nunes, 2004)

Observa-se na Figura 2.2 que a etapa de testes está em todas as metodologias de desenvolvimento do novo produto. Segundo Conzeza (2006, pg. 8) a etapa de testes é composta por duas fases que são: Teste de conceito e teste clínico. O teste de conceito que consiste de uma pesquisa qualitativo-quantitativa junto ao público alvo que tem por objetivo avaliar a aceitação da idéia do produto caso venha ele se tornar realidade. Teste clínico que dependendo do tipo de produto

o gerente de novos produtos deverá solicitar a realização de testes clínicos antes do teste de produto e só iniciará este último após os resultados favoráveis do laboratório.

3.1.3 Generalidades dos testes do novo produto

O teste de produto propriamente dito, aplica-se a produtos de consumo e é uma forma de avaliar o seu desempenho em condições reais de uso. Segundo Mattila (2008, pg. 8), confiabilidade é a habilidade de um produto funcionar sob condições conhecidas, por determinado período de tempo e sem excesso de falhas aceitáveis.

Atualmente, cada organização adota padrões e normas de teste internacional para que o produto tenha os requisitos de um produto confiável. Dentre estes métodos padrões, dois testes experimentais são comumente realizados para avaliar a performance do produto, que são: teste de tração e flexão

3.1.3.1 Ensaio de tração

O ensaio normalmente realizado para determinar as características de um material é o de tração. De acordo com Beer e Johnston, (1991, pg. 40), o ensaio de tração consiste em aplicar uma força de tração, ao longo do eixo do corpo de prova, medindo-se simultaneamente, durante o ensaio, a força aplicada e a deformação que o material sofre, devida à ação da carga. Toma-se o cuidado no que diz respeito à colinearidade do eixo do corpo de prova com a linha de ação da força, evitando os indesejáveis efeitos de flexão que ao sobreporem-se à tração, mascarando os resultados finais, podendo indicar, por exemplo, um baixo módulo de elasticidade e uma baixa tensão limite de escoamento.

A força externa aplicada é normalmente medida por um dinamômetro calibrado, comumente conhecido como célula de carga, quanto à deformação que o material sofre, esta é medida normalmente pelo deslocamento relativo entre dois pontos de referência, previamente marcados, na seção útil do corpo de prova. A medida deste deslocamento relativo pode ser realizada por um processo mecânico, com a necessidade de se fazer a leitura do deslocamento a cada incremento de carga, ou então de uma forma eletroeletrônica, permitindo o traçado da curva força-

deslocamento simultaneamente com o ensaio, por intermédio de softwares de aquisição de dados acoplado à máquina de ensaio. O comprimento padrão, que é a distância que separa os dois pontos de referência, é uma característica do extensômetro usado. Este tipo de extensômetro, extensômetro axial, permite avaliar a deformação que o material sofre ao longo do seu eixo longitudinal.

De acordo com Timoshenko (1967, pg. 28), com a aplicação de carga o material alonga-se, na direção da força, e pelo efeito de Poisson, sofre também uma redução na seção transversal, diminuindo o diâmetro, no caso de uma seção transversal circular, deste modo, outra forma de se medir a deformação pode ser feita através de medida da variação do diâmetro.

A Figura 3.3 ilustra um corpo de prova cilíndrico tipicamente utilizado em ensaios de tração.

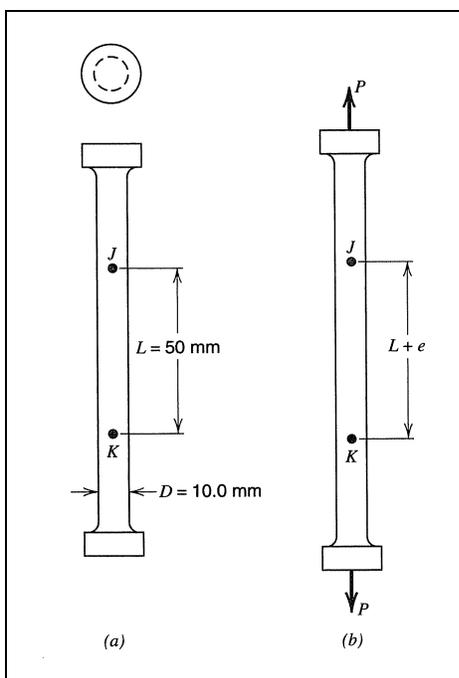


Figura 3.3 – Corpo de prova cilíndrico típico de ensaio de tração. (a) amostra não-deformada: comprimento $L = 50$, diâmetro $= D$; (b) amostra deformada: comprimento alongado $L = 50 + e$. Fonte: Advanced mechanical of materials (Boresi, Schmidt e Sidebottom, 1993).

3.1.3.2 Ensaio de flexão

Ensaio de flexão consiste em apoiar o corpo de prova, em geral de secção retangular ou circular para tubos, em dois pontos distanciados para ser submetido a um carregamento ou deslocamento conhecido, de acordo com Beer e Johnston

(1991, pg. 57). Tensões características observadas nas amostras submetidas ao ensaio de flexão pura são de tração e compressão. A Figura 3.4 ilustra um corpo submetido a flexão de três pontos.

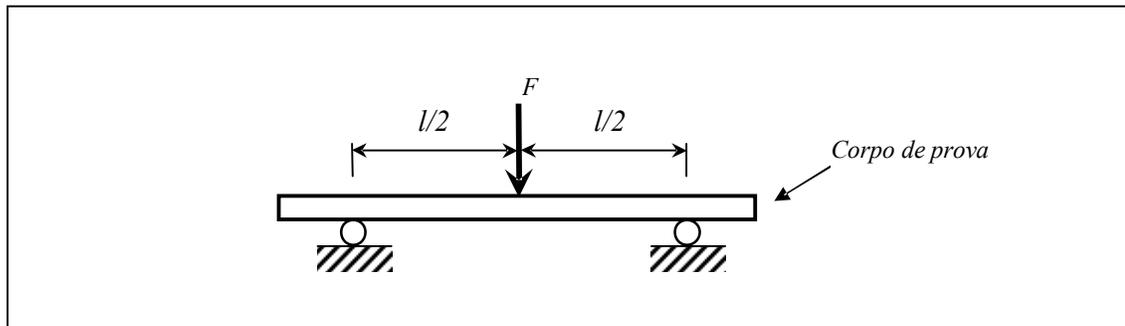


Figura 3.4 – Corpo de prova submetido à flexão de três pontos.
Fonte: Estudo de caso.

3.2 Princípios básicos da extensometria

Segundo Barreira (2007, pg. 3), a extensometria é um conjunto de técnicas experimentais que permitem determinar, analisar e avaliar deformações em um ponto de um corpo através da variação da resistência elétrica dos sensores instalados sobre o corpo.

De acordo com Paulino (2007, pg. 2), a extensometria vem sendo empregada nas mais diversas áreas da engenharia, para o monitoramento e determinação de deformações que efetivamente ocorrem nas estruturas sob solicitações estáticas e dinâmicas. Para seu estudo, se faz necessário lembrar alguns tópicos da Resistência dos materiais, Teoria da elasticidade, Eletricidade e Instrumentação eletrônica.

Segundo Barbosa, (2006, pg. 1), para a realização das análises experimentais de extensometria é necessário a utilização do extensômetro, bem como a instrumentação apropriada para monitorar e armazenar os dados gerados durante o experimento.

3.2.1 Extensômetros

Extensômetros são dispositivos resistivos em forma de película aplicada sobre uma base isolante. Comumente conhecido como *strain gauge*, são aplicados

em um ponto do corpo sob investigação com uso de adesivo de acordo com Andolfato, Camacho e Brito (2004, pg. 1). Segundo Frade (2004, pg. 13), as principais características deste tipo de sensor são:

- Faixa: definida como todos os níveis de amplitude da grandeza física medida nos quais se supõe que o sensor pode operar dentro da precisão especificada.

- Resolução: é o menor incremento da grandeza física medida que provoca uma mudança no sinal de saída do sensor;

- Sensibilidade: é a relação entregue na saída e a grandeza física medida pelo sensor;

- Linearidade: é a capacidade do sensor em fornecer um sinal de saída linear e proporcional ao fenômeno medido;

- Histerese: é um erro de leitura de um sensor que aparece quando se faz leituras no sentido ascendente e descendente.

3.2.2 Propriedade dos extensômetros

O extensômetro elétrico resistivo ou *strain gauge* é um resistor constituído por uma base de poliamida ou epox e por um filamento metálico, normalmente de constantan, que possui configuração em ziguezague (grade). Seis ou mais marcas inscritas na base do sensor servem para facilitar seu posicionamento na peça a ser ensaiada.

O extensômetro é fixado sobre a estrutura em teste por meio de cola de cianoacrilato. Pequenas variações na dimensão da estrutura são transmitidas mecanicamente ao extensômetro, que as transforma em variações equivalentes de sua resistência elétrica. Para Barreira (2007, pg. 4) fidelidade das leituras efetuadas com extensômetro está fortemente relacionada com a aderência deste sobre a superfície do corpo em estudo. Desta forma torna-se necessária, uma apurada técnica de fixação dos strain gauges para evitar eventuais erros na avaliação das deformações superficiais.

A aplicação do tipo de extensômetro depende do material ao qual se pretende realizar a medição. A Figura 3.5 ilustra melhor um tipo de extensômetro unidirecional simples.

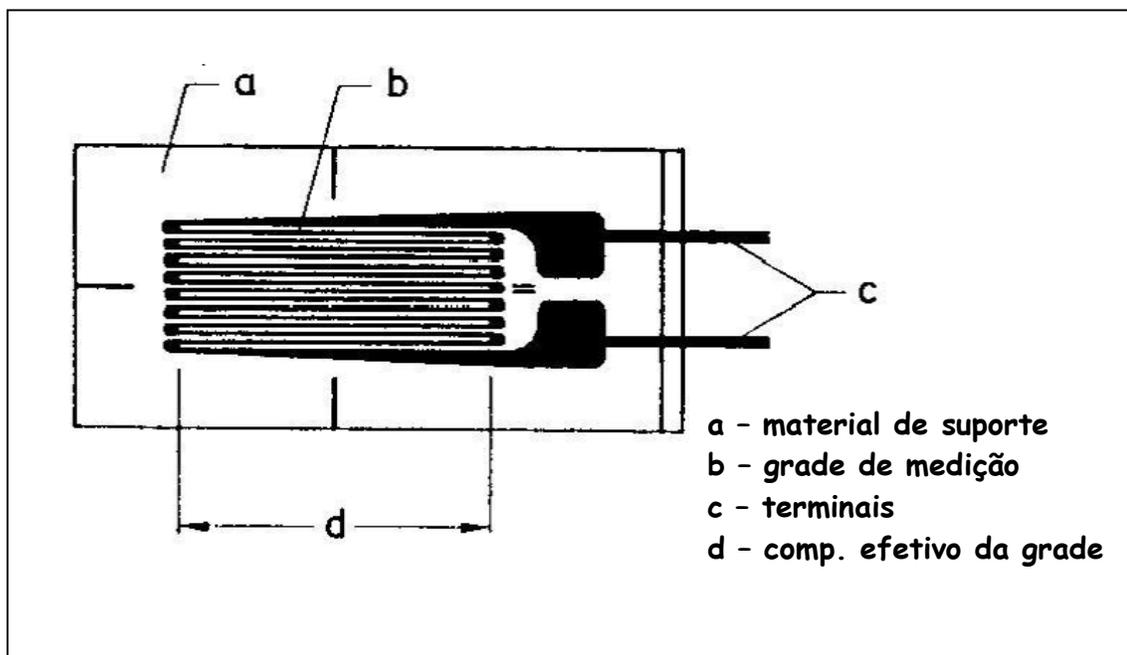


Figura 3.5 – Representação das partes de um extensômetro simples.

Fonte: Apostila de extensometria (Grupo de Análise e Projeto Mecânico, 2004).

Atualmente, o mercado disponibiliza inúmeros tipos de extensômetros, que variam dependendo da aplicação, material condutivo, tamanho, temperatura e material do corpo em análise. A Figura 3.6 alguns tipos de unidirecionais simples.

Material da base e do filme metálico	Compens. de temperatura	Modelos		Opções disponíveis	Dimensões			
		Tamanho e forma da grelha	Resistência (Ohms)		Grelha		Total	
					A (comprim.)	B (largura)	C (comprim.)	D (largura)
PA -	**	125 AA -	120	B; SEN; LEN; EN;S; L	3.18 mm	3.18 mm	6.35 mm	3.18 mm
TA -	**			B; S; L	0.125"	0.125"	0.25"	0.125"
PA -	**	125 AA -	350	B; SEN; LEN; EN;S; L	3.18 mm	3.18 mm	6.35 mm	3.18 mm
TA -	**			B; S; L	0.125"	0.125"	0.125"	0.125"
PA -	**	062 AB -	120	B; SEN; LEN; EN;S; L	1.57 mm	1.57 mm	3.81 mm	1.57 mm
TA -	**			B; S; L	0.062"	0.062"	0.15"	0.062"
PA -	**	062 AG -	350	B; SEN; LEN; EN;S; L	1.57 mm	1.55 mm	3.07 mm	1.55 mm
TA -	**			B; S; L	0.062"	0.061"	0.121"	0.061"
PA -	**	250 AG -	120	B; SEN; LEN; EN;S; L	6.35 mm	6.35 mm	10.8 mm	6.35 mm
TA -	**			B; S; L	0.25 "	0.25 "	0.425"	0.25 "

Figura 3.6 – Modelos de extensômetros unidirecionais segundo fabricante Excel sensores.

Fonte: Catálogo fabricante (Excel sensores 2007).

A identificação de cada extensômetro segue uma codificação de acordo com cada fabricante, conforme suas características. A Figura 3.7 representa uma gama de configurações a partir de códigos, que são específicos do fabricante Kyowa.

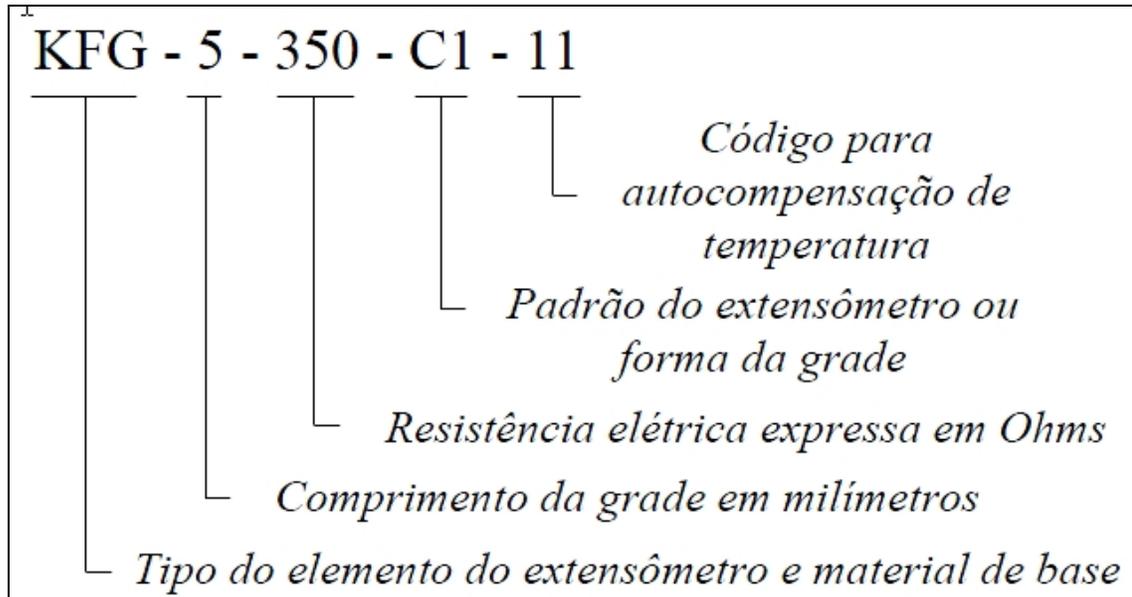


Figura 3.7 – Esquema de identificação utilizado nos extensômetros do fabricante Kyowa.

Fonte: Extensometria básica (Andolfato, Camacho e Brito, 2004).

3.2.3 Fixação do extensômetro na peça

O processo de fixação difere dependendo do tipo do extensômetro, tipo de adesivo e ambiente operacional. O procedimento de adesão de um strain gauge laminado a temperatura normal usando cola cianoacrilato (*super Bond*), segundo fabricante Kyowa, consiste em:

- Selecionar o strain gauge: o comprimento do strain gauge deve atender as necessidades da medição;
- Remoção de resíduos: polir a superfície do corpo usando uma lixa (#200 ou 300);
- Marcas para posicionamento: marcas para referência são úteis para posicionar corretamente o strain gauge e também indicar a direção da medição;
- Remoção de impurezas: limpar a superfície do corpo usando pano limpo com gotas de álcool etílico ou acetona
- Aplicação da cola: aplicar gotas de cola a base de cianoacrilato (*super Bond*) no strain gauge;

- Adesão do extensômetro: Após aplicação da cola o strain gauge deve ser posicionado cuidadosamente na superfície do corpo alinhando com as linhas de referencia;
- Pressionamento: pressionar uma superfície plana (preferencialmente de borracha, contra o strain gauge para garantir adesão uniforme;
- Inspeção: inspecionar visualmente se a adesão apresenta completa adesão.

3.2.4 Características elétricas dos extensômetros

A resistência (R) medida em ohms do filamento depende da geometria e resistividade do material. O cálculo de R em uma seção transversal do fio de resistividade ρ , conforme representado na Figura 3.8, que compõe o extensômetro, é dado pela Equação 2.1, que geralmente é estabelecida para metais comuns a uma temperatura ambiente submetidos a uma baixa frequência de corrente.

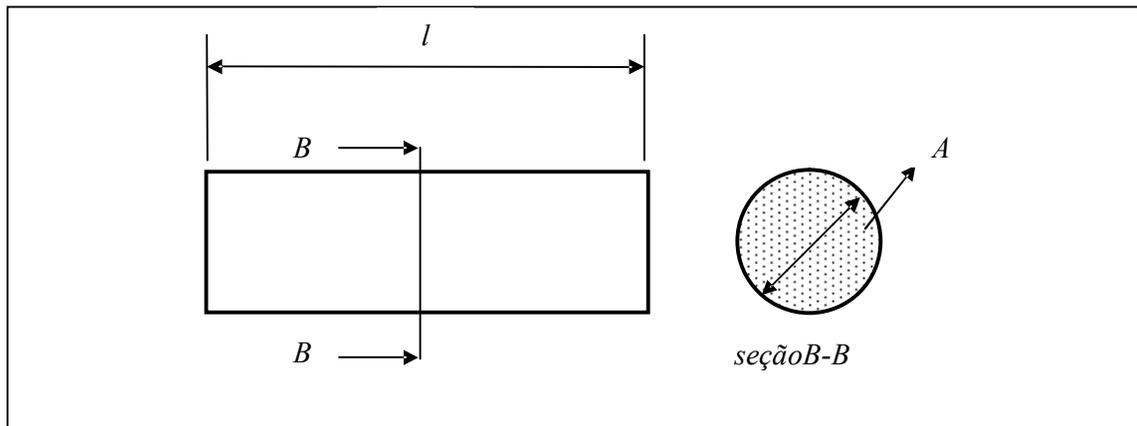


Figura 3.8 – Seção transversal de um fio.

Fonte: Estudo de caso.

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad .1$$

Onde: R = resistência

l = comprimento do fio

ρ = resistividade do fio

A = área da seção transversal do fio

Quando aplicada uma força de tração (F) nas extremidades deste fio, a resistência elétrica é alterada em função de pequenas variações da área e comprimento do fio, conforme ilustrado na Figura 3.9.

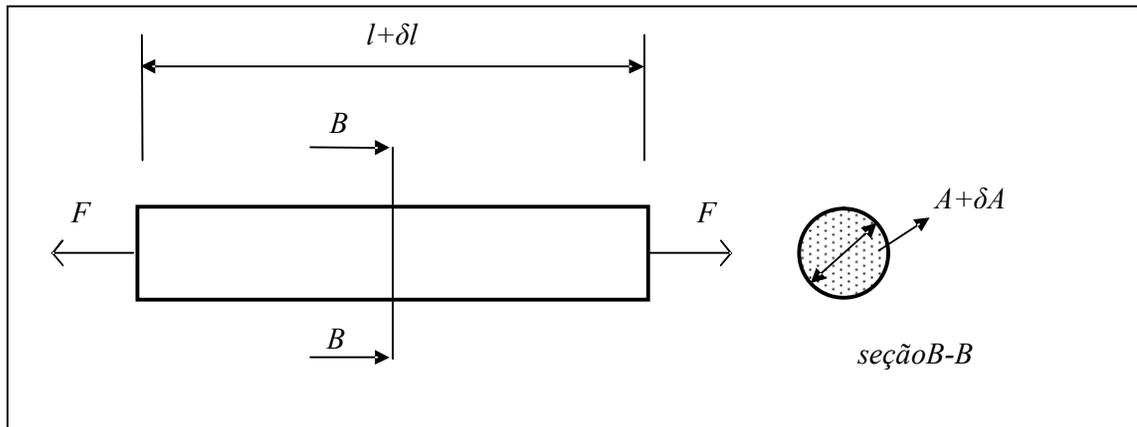


Figura 3.9 - Seção transversal em um fio sob o efeito de carga (F).

Fonte: Estudo de caso.

Desta forma, a variação na resistência elétrica do fio pode ser expressa pela Equação 2.2:

$$\Delta R = \rho \frac{l}{A} - (\rho + \Delta\rho) \frac{l + \Delta l}{A + \Delta A} \quad 3.2$$

Onde: ΔR = variação da resistência

ΔL = variação do comprimento do fio

$\Delta\rho$ = variação da resistividade do fio

ΔA = variação da área da seção transversal do fio

Fisicamente, a grade do extensômetro sofre pequenas alterações quando o material ao qual está colado é comprimido ou alongado. Ou seja, a variação na resistência pode ser expressa também por meios diferenciais, conforme Equação 3.3.

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta\rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta A}{A} \quad 3.3$$

Sabendo que a área da seção transversal do fio é dada por $A = \frac{\pi D^2}{4}$, onde

D é o diâmetro da circunferência, estabelece-se que

$$\frac{\Delta A}{A} = 2 \frac{\Delta D}{D} \quad 3.4$$

A deformação axial, representado pelo símbolo ε_x , a qual o fio está submetido, obedece à lei de *Hooke* até que não seja excedido o limite de elasticidade do material. Para este caso, deve-se considerar também a deformação específica na direção radial, a qual é representada por ε_r . Esta deformação é produzida pela força F que proporciona pequenas contrações na direção transversal do material.

Admitindo a hipótese de pequenos deslocamentos, a deformação radial (ε_r) e a deformação axial (ε_x) podem ser expressas por:

$$\varepsilon_r = \frac{\Delta D}{D} \quad 3.5$$

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta l}{l} \quad 3.6$$

O coeficiente de *Poisson* (ν) é obtido por meio da relação entre ε_r e ε_x e pode ser expresso segundo a Equação 2.7:

$$\nu = -\frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_x} \quad 3.7$$

As equações 2.4, 2.5 e 2.7 podem ser usadas para se obter a relação:

$$\frac{\Delta A}{A} = 2\varepsilon_r = -2\varepsilon_x \quad 3.8$$

Substituindo as equações 2.6 e 2.8 na equação 2.3, pode-se estabelecer que:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \varepsilon_x + 2\nu\varepsilon_x = \frac{\Delta \rho}{\rho} + (1 + 2\nu)\varepsilon_x \quad 3.9$$

Este resultado expressa a proporcionalidade entre resistência e deformação, definida como sensibilidade ou ainda *Gauge Factor* (K), que pode ser expresso por:

$$K = 1 + 2\nu + \frac{\Delta \rho / \rho}{\varepsilon_x} = \frac{\Delta R / R}{\varepsilon_x} \quad 3.10$$

3.2.5 Influência do fator de sensibilidade (K)

Considerando os pontos A, B e C do circuito elétrico representado na Figura 3.10, tem-se:

$$e = \frac{R_g}{R_g + R_b} E$$

3.11

Onde: E = diferença de potencial na entrada do circuito

R_g e R_b = resistores do circuito

e = diferença de potencial entre os pontos A e B

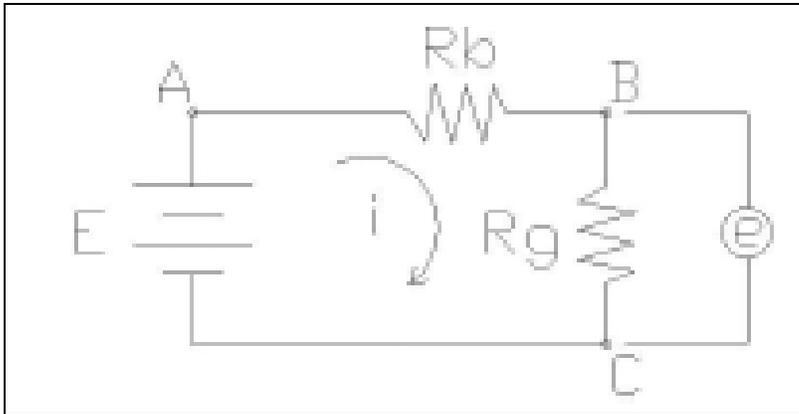


Figura 3.10 – Representação de um circuito elétrico simples.

Fonte: Estudo de caso

Ao se utilizar um extensômetro em substituição de R_g no circuito e após aplicação de um carregamento sobre o material em que se encontra fixado, observa-se uma pequena variação na resistência ($\Delta R_g \sim dR_g$) que gera uma pequena variação na diferença de potencial em função da variação na resistência no extensômetro $\left(\frac{\Delta e}{R_g}\right)$, podendo ser expressa por:

$$\frac{\Delta e}{R_g} = \frac{R_g \cdot E}{(R_g + R_b)^2} \cdot \frac{\Delta R_g}{R_g} \quad 3.12$$

E, substituindo a equação 2.11 na equação 2.12, tem-se

$$\frac{\Delta e}{R_g} = \frac{R_g \cdot E}{(R_g + R_b)^2} K \cdot \varepsilon_x \quad 3.13$$

A máxima sensibilidade do circuito, ou seja, a maior variação da diferença de potencial (Δe) na saída pode ser atingida quando se tem $R_b = R_g$, representada pela equação:

$$\Delta e = \frac{K}{4} \varepsilon_x E \quad 3.14$$

A grande desvantagem para o tipo de configuração do circuito analisado é a produção de pequenas variações na saída. Como exemplo, pode-se citar uma configuração típica com $K = 2,0$; $R_g = 120 \text{ Ohms}$ $\varepsilon = 5 \text{ micro-deformações}$ ($5 \times 10^{-6} \text{ mm/mm}$).

Pela a equação 2.12, observa-se que a leitura na variação da diferença de potencial (Δe) na saída seria igual a $0,0000025 \times E \text{ volts}$. Este exemplo mostra que o circuito requer uma diferença de potencial com uma resolução de, pelo menos, 6 décimos de precisão no aparelho.

Para este tipo de aplicação, uma das soluções que pode ser adotada para se obter uma melhor resolução na leitura da diferença de potencial é o uso de pontes de *Wheatstone*, conforme a seguir.

3.2.6 Ponte de Wheatstone

Em 1843, o físico Charles Wheatstone desenvolveu um circuito elétrico para medição de resistência elétrica, e atualmente este circuito amplamente utilizado na engenharia de instrumentação é conhecido com ponte de Wheatstone. O princípio do strain gauge consiste em transformar deformação em uma variação proporcional da sua resistência elétrica. Pequenas mudanças de resistência que o strain gauge está sujeito pode ser monitorada por uma ponte de Wheatstone. A Figura 3.11 apresenta um modelo de ponte de Wheatstone com um strain gauge de dois fios (r_1 e r_2).

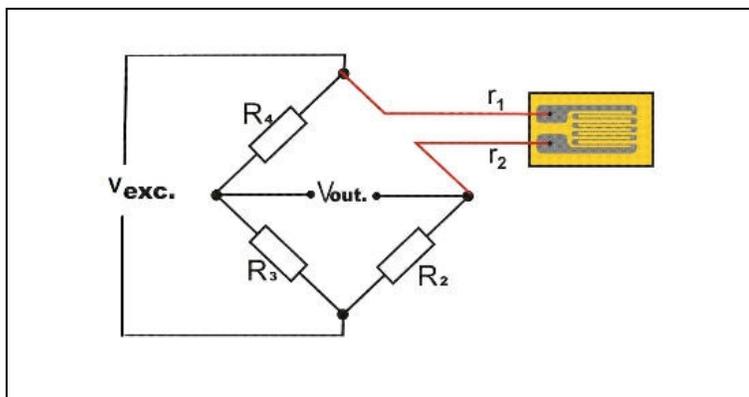


Figura 3.11 – Ponte de Wheatstone – ¼ da ponte ativa com strain gauge.
 Fonte: Catalogo Kyowa.

3.2.7 Unidade da deformação

Segundo Hoffman (1989, pg. 19), a unidade para a medida do comprimento é o metro (m). Deformação é determinada com o cociente da variação do comprimento Δl pelo o comprimento inicial l_0 . Logo a unidade m/m é designada para deformação. No entanto, está relação é conhecida como adimensional. Normalmente as mudanças no comprimento são muito pequenas, e uma forma padronizada para expressar a deformação é: $\mu\text{ mm/mm}$ (10^{-6}mm/mm).

3.2.8 Vantagens e desvantagens

Extensômetros são comumente usados para medir deformações de diferentes estruturas. A medida é realizada colando o strain gauge na superfície da estrutura, convertendo a deformação causada em voltagem elétrica. Segundo Andolfato, Camacho e Brito (2004, pg. 20), este método apresenta excelentes resultados, e suas principais vantagens são: alta precisão, pequeno tamanho e peso, fácil manuseio, medições em diferentes faixas de temperatura, útil para medição de várias quantidades físicas (força, pressão, torque, aceleração, deslocamento e pressão), e conseqüentemente em controle de processos.

No entanto, um dos principais fatores que afetam a utilidade e performance do strain gauge é o material que o condutor é feito. Idealmente o condutor deve ter elevada sensibilidade, ou seja, o constante K presente.

3.3 Tecnologia de impressão a jato de tinta de nano-materiais

A fabricação de linhas condutivas, comumente conhecidas como circuito impresso, é vital e necessária para a indústria de produtos eletrônicos. Métodos tradicionais para a construção destes circuitos envolvem inúmeras etapas em seu processo, o que resulta em tempo e custo. Além destes fatores, o uso de substâncias nocivas ao meio ambiente tem limitado a fabricação e performance destes produtos. Por estas razões, o desenvolvimento de novas técnicas e processos de baixo custo e amigável ao meio ambiente tem atraído atenção nos últimos anos. Para Park (2007, pg. 1), a tecnologia de impressão a jato de tinta é considerada como uma promissora alternativa para os métodos convencionais de construção de circuito impresso.

A impressão pelo método de jato de tinta requer tintas com baixa viscosidade, que após o processo de secagem possam se tornar linhas condutivas. Vários tipos de materiais têm sido estudados, i.e., ferro fundido, polímeros condutivos, composto metal-orgânico e suspensão de nano-partículas. Muitos destes materiais têm sua aplicação restrita pelo custo ou processo. No entanto, recentes estudos mostraram que nano-partículas de prata apresentam propriedades satisfatórias que possibilitam o uso destes materiais para construção de linhas condutivas e interconexões.

3.3.1 Nano-partículas de prata pra impressão a jato de tinta

Segundo Gleiter (2009, pg. 123), materiais nano-estruturados são caracterizados por uma estrutura com tamanho em dimensões nanométricas, que podem ser obtidos por diferentes processos, tais como, solidificação rápida, moagem de alta energia, entre outros. Nano-partículas de prata, da ordem de 10^{-9} m, combinada com solvente orgânico possibilitam a construção de circuito impresso de baixa densidade. De acordo com Suganuma, Wakuda, Hamatura e Kim (2007, pg. 1), a fabricação de nano-partículas de prata tem como principais vantagens a condutividade, estabilidade e o custo.

3.3.2 Variáveis do processo de impressão

Segundo Bonadiman (2006, pg. 1), o controle do processo é de grande importância pra se obter uma impressão com qualidade. Para isto, as variáveis do processo: temperatura da tinta, a distância do cartucho de tinta em relação ao substrato, temperatura da mesa onde o substrato é posicionado e o tratamento superficial do substrato; devem estar devidamente adequada ao tipo de impressão. A figura 2.12 apresenta um tipo de impressora a jato de tinta para produção de circuito elétrico por meio de impressão de nano-partículas metálicas.

Recentes estudos avaliaram a qualidade da impressão em superfície de filme de PET (polietileno) que foram submetidos a diferentes tratamentos. De acordo com Suganuma (2007, pg. 2), a condição da superfície do substrato é um dos parâmetros chave para a qualidade de impressão de linhas condutivas. Superfície de um PET sem tratamento apresentaram linhas condutivas dispersas, e para a superfície do mesmo PET que teve um tratamento superficial apresentaram linhas condutivas

finas e uniformes. Estas investigações também revelarão que substratos com superfície porosa absorvem efetivamente a deposição de camada de tinta.

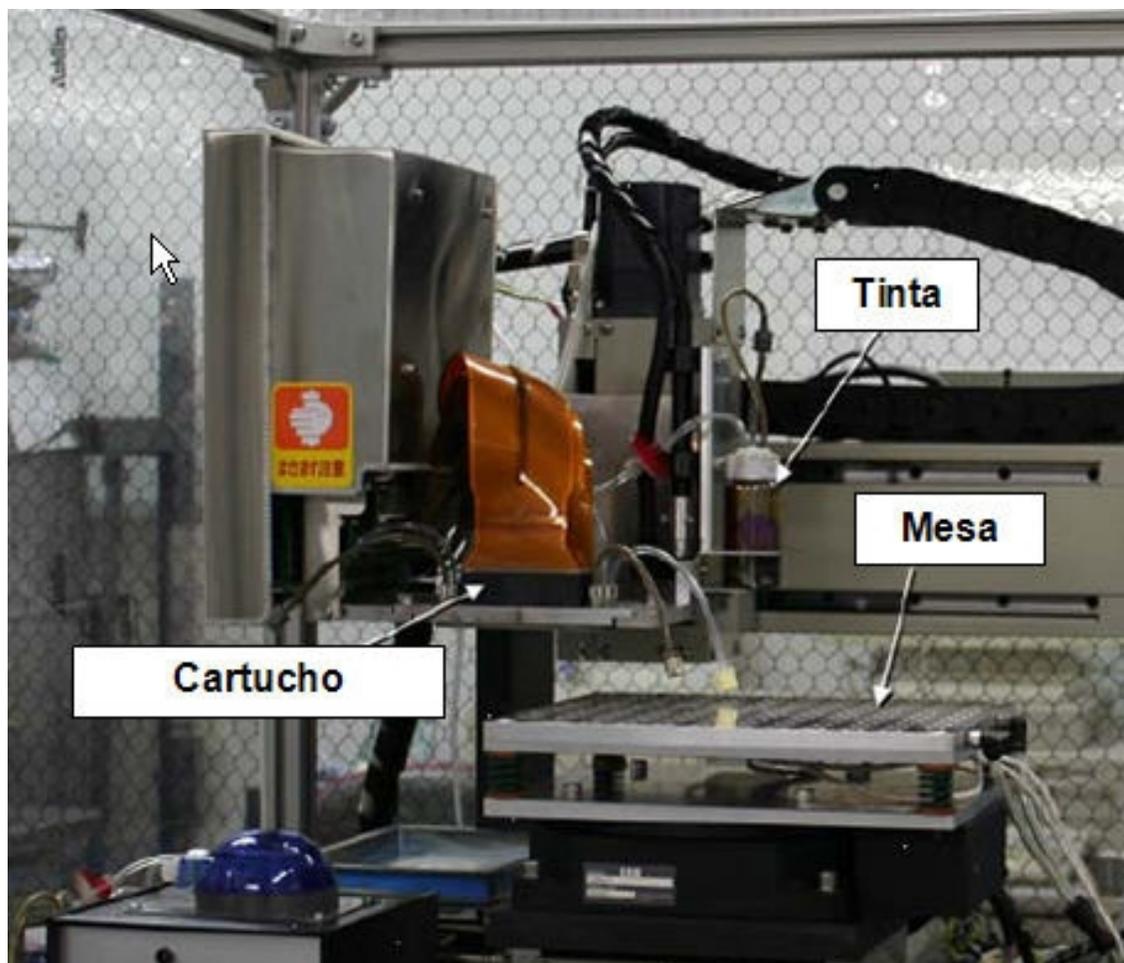


Figura 3.12 – Impressora a jato de tinta para impressão de nano-partículas metálica.

Fonte: Ink-jet Printing of nano materials and processes for electronics applications (Suganuma, 2007).

4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL PROPOSTO PARA VALIAÇÃO DO NOVO MODELO DE EXTENSOMETRO

Neste capítulo será apresentado o método de pesquisa utilizado, esclarecendo o tipo de pesquisa realizada, método de coleta de dados, tratamento dos dados e limitações da pesquisa.

4.1 Tipo de pesquisa

A pesquisa apresentada neste trabalho trata-se de uma pesquisa experimental, com o propósito de avaliar a performance de um produto durante a fase do seu desenvolvimento.

A pesquisa consiste em avaliar as medições obtidas pelo extensometro impresso quando submetidas a dois ensaios mecânicos: tração e flexão. Porém, para validar os resultados obtidos pelo extensometro impresso utiliza-se extensometro convencional com o intuito de comparar as medições.

4.2 Método experimental para coleta dos dados

A proposta do novo extensometro foi impresso na superfície de um filme retangular polimérico, comercialmente conhecido como Polyamide Dupont Kapton, com dimensão de 100 mm x 25 mm e espessura de 130 μm segundo a norma ASTM D 638-3 para ensaio de tração. A impressora utilizada foi a Dimatix modelo 2831 com temperatura da base em 60 °C com apenas um bocal para a impressão de cada traço do extensometro impresso.

A tinta condutiva utilizada para impressão do é composta por nanopartículas de prata (Ag) com 50% de metal em um solvente polar.

Finalizada o processo de impressão, as amostras foram submetidas à temperatura de 310° para remoção dos agentes dispersivos da tinta, melhorando assim, o contato entre as nanopartículas de Ag. Devido ao fato de que resistência

elétrica do extensômetro impresso está relacionada com o contato entre as nanopartículas de Ag, as amostras permaneceram no forno até atingirem resistência de 120 ± 1 ohms.

Fios foram aderidos aos terminais das amostras para monitoramento da resistência elétrica durante as avaliações experimentais. Para isso, um adesivo condutivo foi utilizado para fixação dos fios à superfície dos terminais.

As amostras foram condicionadas a temperatura de $25 \text{ °C} \pm 1 \text{ °C}$ e umidade relativa do ar $50 \pm 10 \%$. A **Figura 4.1** ilustra o extensômetro impresso após a etapa de impressão, sinterização e adesão dos fios aos terminais.

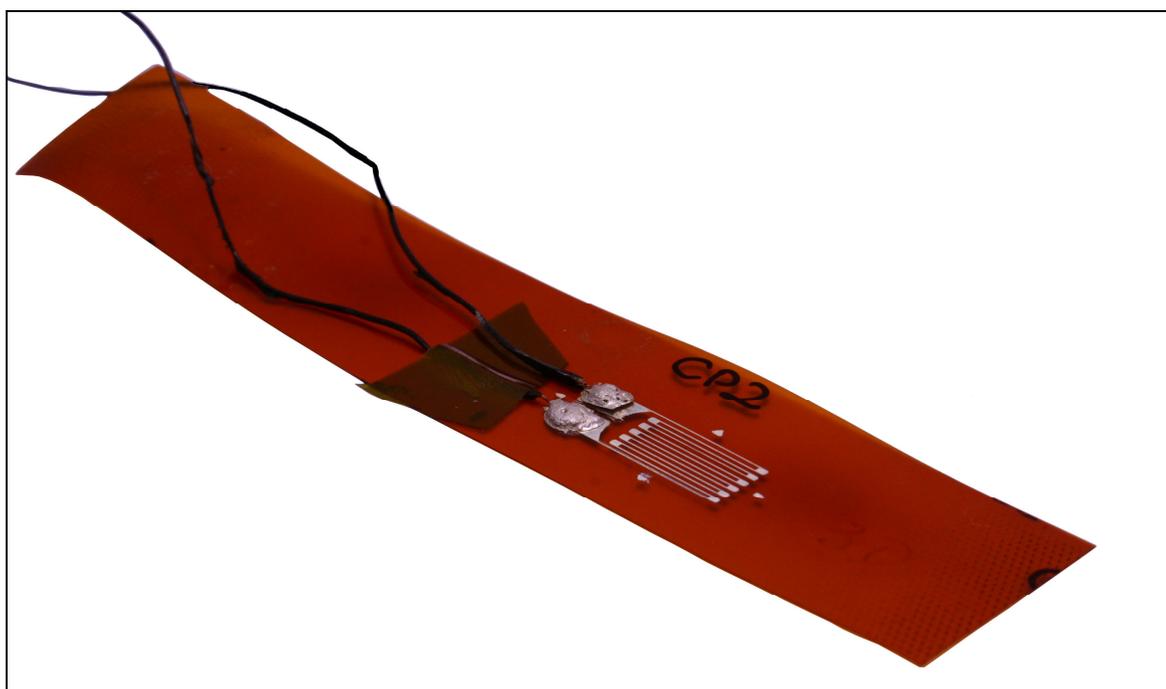


Figura 4.1 – Extensômetro impresso na superfície do filme polimérico.
Fonte: Estudo de caso

A avaliação experimental adotada neste trabalho consiste em determinar as características do extensômetro impresso e realizar medições com extensômetro convencional para posteriormente serem comparadas.

4.2.1 Características do extensômetro convencional

O extensômetro convencional utilizado neste trabalho necessita de cola do tipo cianocrilato para adesão da superfície do corpo a ser avaliado. As principais características desse sensor são apresentadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Principais características do extensômetro convencional.

Resistência nominal	119.6 ± 0.4 Ω
Comprimento do sensor	5 mm
Sensibilidade	K = 2.10
Modelo	KFG-5-120-C1
Fabricante	Kyowa

Fonte: Catalogo Kyowa

4.2.2 Características do extensômetro impresso

O extensômetro impresso apresenta dimensões similares aos do convencional. Após o processo de sinterização o extensômetro impresso foi medido por uma máquina de medição óptica Quick Vision Mitutoyo para avaliar se houve alteração nas dimensões.

O fator de sensibilidade, ou proporcionalidade, que relaciona a extensão com a variação unitária de resistência elétrica do extensômetro é obtido pela Equação 2.10 descrita no Capítulo 2,

$$K = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\varepsilon} \quad 2.10$$

onde:

ΔR = variação da resistência;

R = resistência inicial do extensômetro;

ε = deformação efetiva do corpo.

Para tal, cinco amostras com extensômetro impresso no filme de Polyamide foram submetidos ao ensaio de tração, conforme demonstrado pela Figura 3.2. Ao longo do ensaio de tração a variação da resistência elétrica e do comprimento das amostras foram monitorados por meio de um multímetro e uma câmera de alta definição respectivamente.

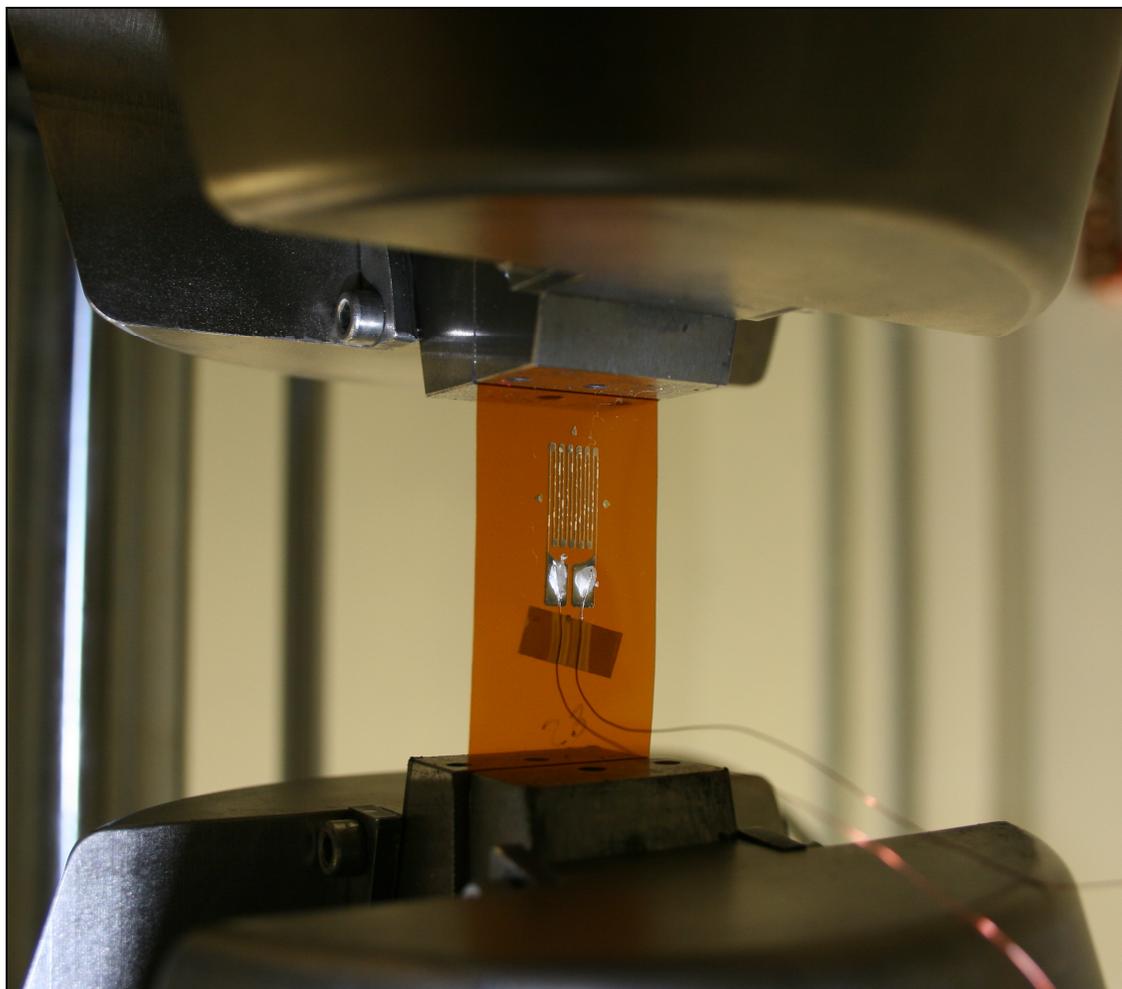


Figura 4.2 – Filme de polyamide com extensometro impresso entre garras para a avaliação do fator de sensibilidade

Fonte: Estudo de caso

4.2.3 Ensaio de tração

As amostras de polyamide foram submetidas à crescente carregamento na direção axial, tendo as deformações correspondentes mensuradas por meio dos extensometro impresso e extensometro convencional. As amostras foram fixadas na máquina universal para ensaios mecânicos Instron modelo 8874, com distância entre garras de 50 mm. O teste foi conduzido até a ocorrência do rompimento de um dos extensometros. Total de cinco amostras foram avaliadas no ensaio de tração.

Estes extensometros foram montados em um circuito elétrico, com ponte de Wheatstone do tipo completa, que foi capaz de realizar as medições de variação de resistência elétrica em seus braços do circuito. A variação na resistência elétrica do extensometro, devido à deformação do filme de Polyamide, provocou um

desequilíbrio da ponte, que por sua vez passa por um amplificador de voltagem, que por sua vez está conectado a uma placa de aquisição de dados. Os dados foram processados e transformados em micro deformação através de um computador. O diagrama apresentado na Figura 4.3 mostra um esquema do sistema de medição para os extensômetros.

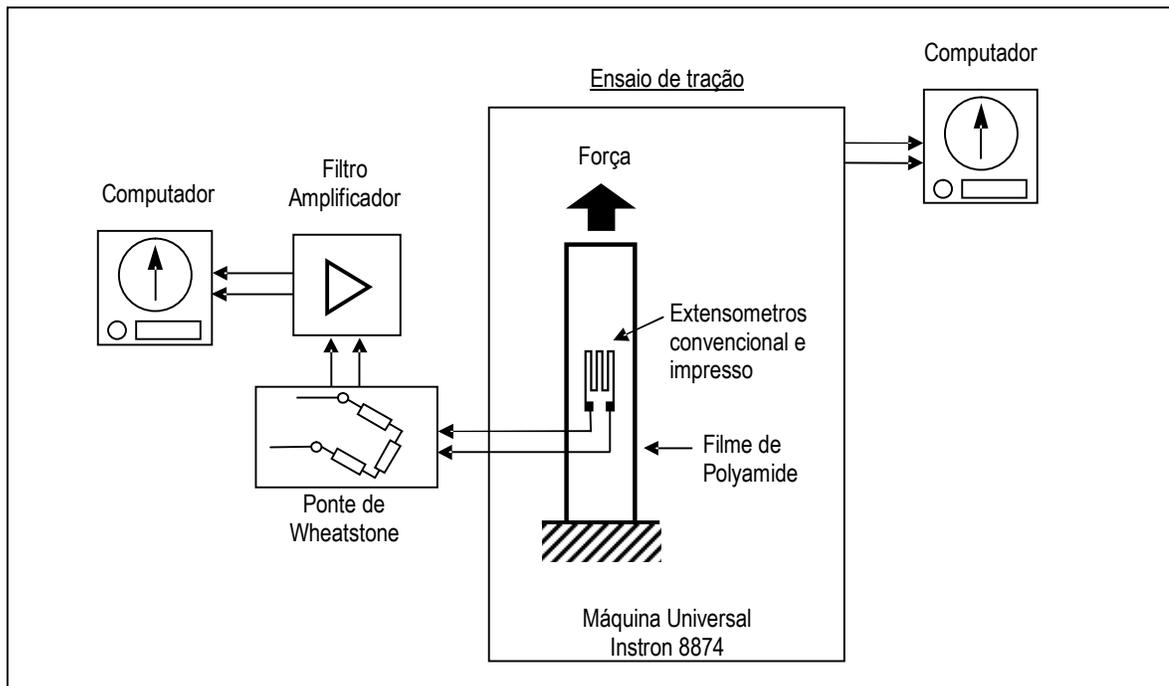


Figura 4.3 – Diagrama do sistema de medição para medição de deformação do ensaio de tração através dos extensômetros

Fonte: Estudo de caso

4.2.4 Ensaio de flexão

Teste de flexão a quatro pontos foram conduzidos na amostras de polyamide com extensometro impresso e convencional seguindo padrões da norma ASTM D 790 – 03. A máquina universal para ensaios mecânicos Instron modelo 5564 foi utilizada para realização deste experimento. A distância entre os pontos de apoio e aplicação de força estão no diagrama apresentado pela Figura 4.4.

As amostras submetidas a esse tipo de ensaio possuem as mesmas dimensões das amostras ensaiadas no teste de tração. Estas foram posicionadas no dispositivo para ensaio de flexão com o extensometro dispostos sob ação de esforço de tração. O ensaio de flexão foi conduzido ensaios cíclicos com deslocamento máximo de 5 mm a uma taxa de deslocamento constante de 10 mm/s. O diagrama

apresentado na Figura 4.3 mostra um esquema do ensaio de flexão, e bem como o sistema de medição para os extensômetros.

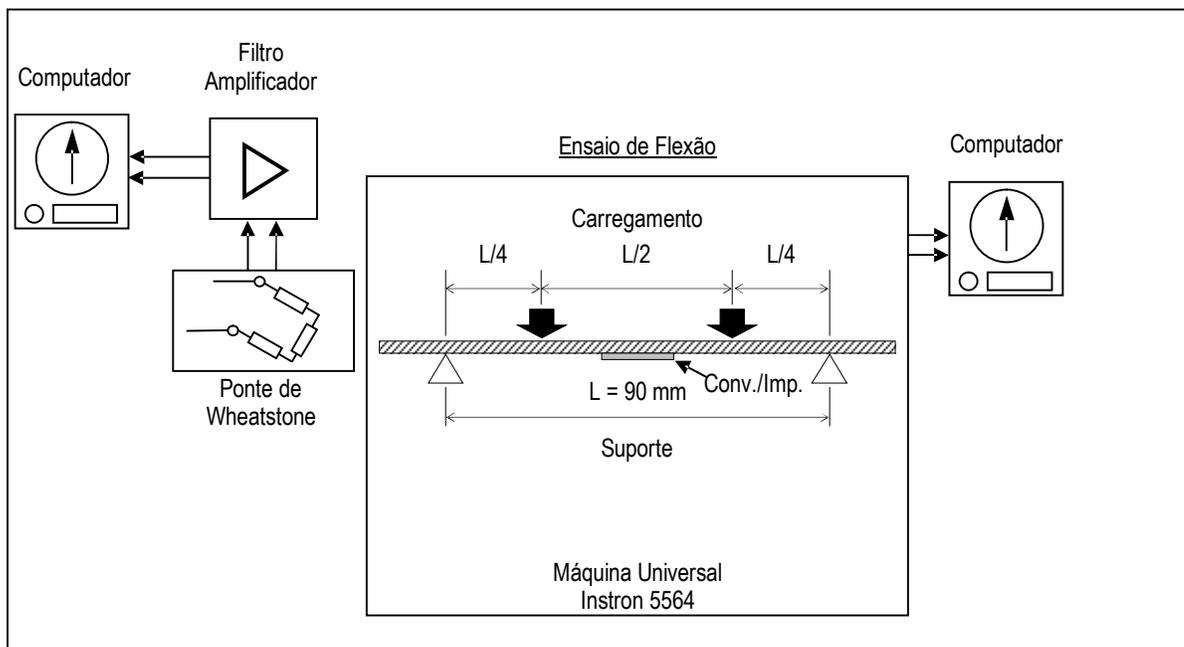


Figura 4.4 – Diagrama do sistema de medição para medição de deformação do ensaio de flexão através dos extensômetros.

Fonte: Estudo de caso

4.3 Tratamento dos dados

Os dados coletados através do sistema de aquisição foram tratados por meio de tabela, gráficos em planilha eletrônica. As seguintes análises foram realizadas para cada modelo de extensômetros:

- Media da sensibilidade medida de cada extensometro;
- Media das curvas de deformação para os ensaios de flexão e tração
- Limites de cada sensor para materiais flexíveis;

4.4 Limitações dos sensores

Devido os extensômetros limitarem-se apenas a medições de deformações no regime elástico dos materiais, os dados analisados para o ensaio de tração são correspondentes a porção linear da relação tensão-deformação do substrato da polyamide. A Figura 4.5 ilustra a porção linear, através do quadro cinza, no diagrama tensão-deformação do filme de polyamide.

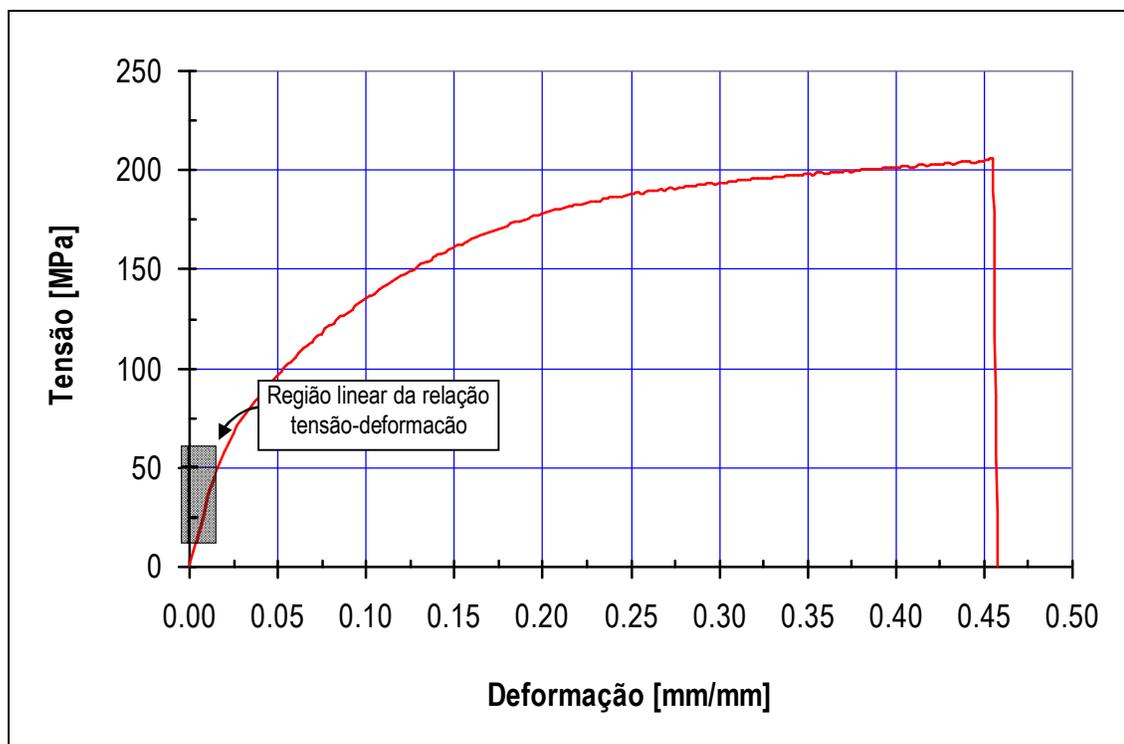


Figura 4.5 – Diagrama tensão-deformação do filme polimérico Polyamide DuPont.
Fonte:

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Realizou-se a análise dos resultados das leituras obtidas por meio do sistema de aquisição de dados, e de posse destes resultados, analisou-se a resposta de cada extensômetro. Ressalta-se que as medições realizadas estão dentro do limite elástico do substrato polimérico de Polyamide.

5.1 Análise de sensibilidade (K) de cada extensômetro

O fator K ou sensibilidade do extensômetro versa da relação entre a deformação e a variação da resistência, da pela equação 2.10. Estas grandezas foram monitoradas simultaneamente durante o ensaio de tração. Cinco amostras de cada extensômetro foram submetidas a este teste. Durante a realização deste teste catorze dados foram capturados. A Tabela 4.1 apresenta a sensibilidade média para o extensômetro convencional. Os dados correspondentes a cada aquisição são referentes à média das medições de $\Delta R/R$ e ε (mm / mm).

Tabela 5.1 – Valor médio (desvio padrão) do fator sensibilidade do extensômetro convencional.

Extensômetro convencional			
Aquisição	$\Delta R / R$ (Ω / Ω)	ε (mm / mm)	$K = (\Delta R / R) / \varepsilon$
1	0.006	0.003	2.09
2	0.016	0.008	2.09
3	0.027	0.013	2.09
4	0.036	0.018	2.09
5	0.048	0.023	2.10
6	0.059	0.029	2.08
7	0.072	0.035	2.09
8	0.084	0.040	2.11
9	0.097	0.046	2.10
10	0.110	0.052	2.11
11	0.123	0.059	2.09
12	0.135	0.065	2.09
13	0.148	0.070	2.11
14	0.163	0.078	2.09
Média			2.09
Desvio padrão			0.5 %

FONTE: Estudo de caso.

Nota-se que o condutor utilizado para a construção do extensômetro convencional apresenta uma relação linear entre a variação da resistência e a deformação.

A Figura 4.1 apresenta graficamente a relação linear entre a variação da resistência e a deformação do extensômetro convencional. O fator K médio obtido por meio das cinco avaliações experimentais é 2.09 com desvio padrão de 0.5%. De acordo com o fabricante, e apresentado na Tabela 3.1 do capítulo anterior, este modelo de extensômetro possui o fator K igual a 2.1. A comparação do resultado deste teste com os dados fornecido pelo fabricante corrobora o método experimental realizado, e descrito na seção 3.2, para determinar o fator de sensibilidade.

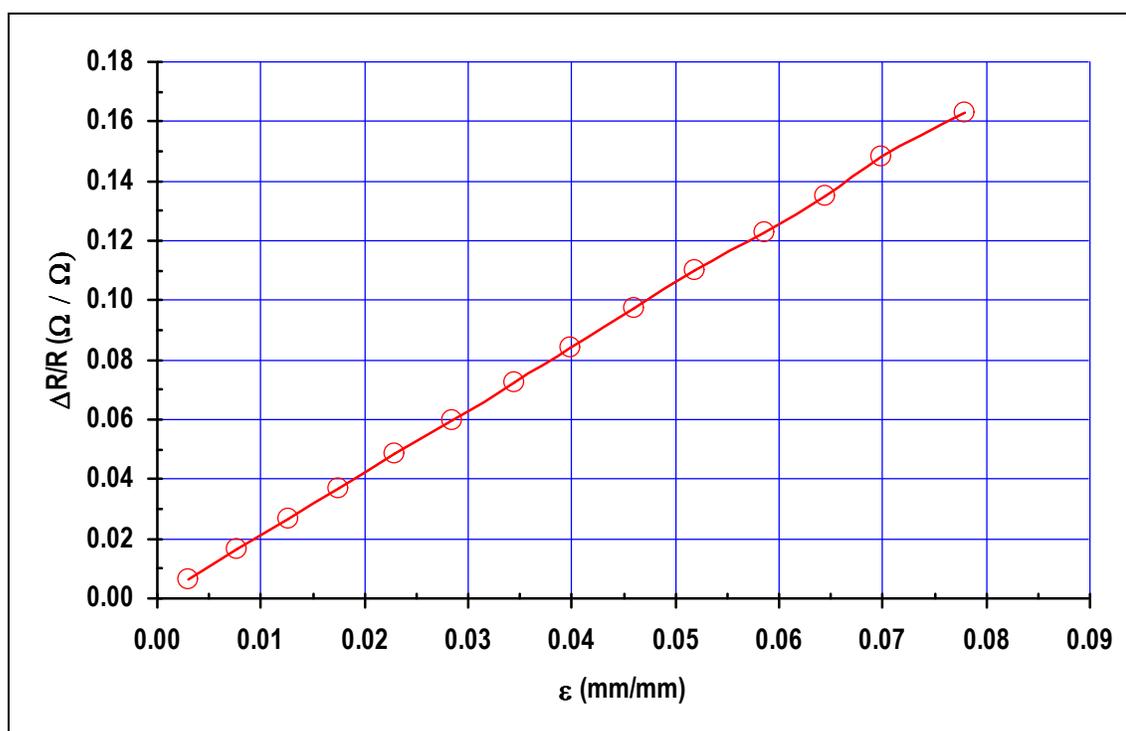


Figura 5.1 – Sensibilidade (K) à deformação do extensômetro convencional obtido por meio experimental.

FONTE: **Estudo de caso.**

Na tabela 4.2 são apresentados os dados referentes a cinco amostras de extensômetro impresso submetido a análises de sensibilidade. Nota-se que o valor médio entre as cinco primeiras medições há uma significativa diferença. Esta variação demonstra que o extensômetro impresso apresenta um comportamento não-linear para pequenas deformações. Entretanto, as demais aquisições são de valor similar (~ 17.1).

Tabela 5.2 – Valor médio (desvio padrão) do fator sensibilidade do extensômetro impresso.

Extensômetro impresso			
Aquisição	$\Delta R / R (\Omega / \Omega)$	$\varepsilon (\text{mm} / \text{mm})$	$K = (\Delta R / R) / \varepsilon$
1	0.052	0.004	14.93
2	0.134	0.009	15.76
3	0.257	0.016	16.06
4	0.387	0.023	16.82
5	0.572	0.034	16.89
6	0.870	0.051	17.05
7	0.988	0.058	17.03
8	1.244	0.073	17.05
9	1.526	0.089	17.16
10	1.839	0.105	17.51
11	2.177	0.128	17.01
12	2.528	0.148	17.10
13	3.012	0.177	17.02
14	3.445	0.201	17.11
Média			16.67
Desvio padrão			0.4 %

FONTE: Estudo de caso.

A Figura 4.2 apresenta o fator K (16.7) ao longo da variação da resistência e da deformação.

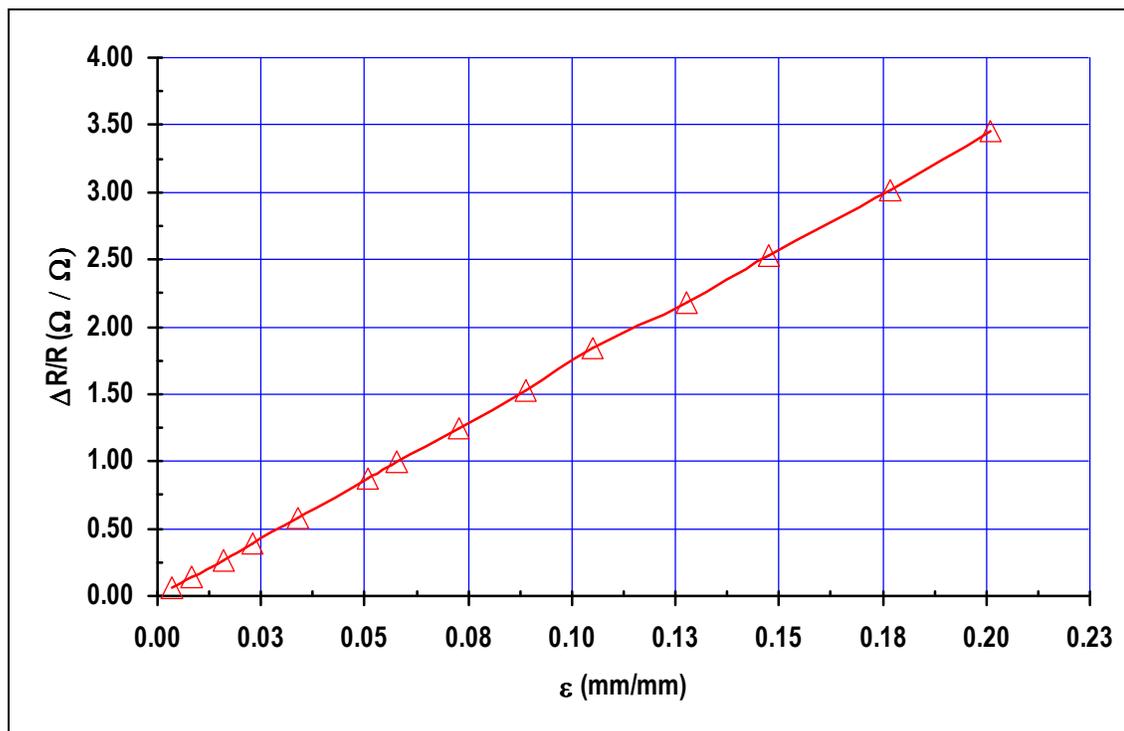


Figura 5.2 – Sensibilidade (K) à deformação do extensômetro impresso obtido por meio experimental.
 FONTE: Estudo de caso.

A Figura 4.3 apresenta as duas retas de sensibilidade de cada extensômetro. Observa-se que o extensômetro impresso apresenta a reta de sensibilidade maior que a do convencional. Quanto maior a inclinação da reta maior o fator. Um dos fatores que explicam a inclinação da reta do extensômetro impresso são as nanopartículas de prata. Uma das principais características da prata é a elevada condutividade.

Quanto à diferença da deformação monitorada, mostra que o extensômetro impresso pode sofrer grandes deformações, e mesmo assim o fator K se mantém constante. Este evento não pode ser avaliado pelo extensômetro convencional devido ao uso da cola para fixação no corpo de prova. A cola de cianocrilato por apresentar elevada rigidez depois de curada, restringe a medição dos extensômetros convencionais do tipo folha para pequenos deslocamentos, pois o extensômetro tende a descolar do corpo em análises

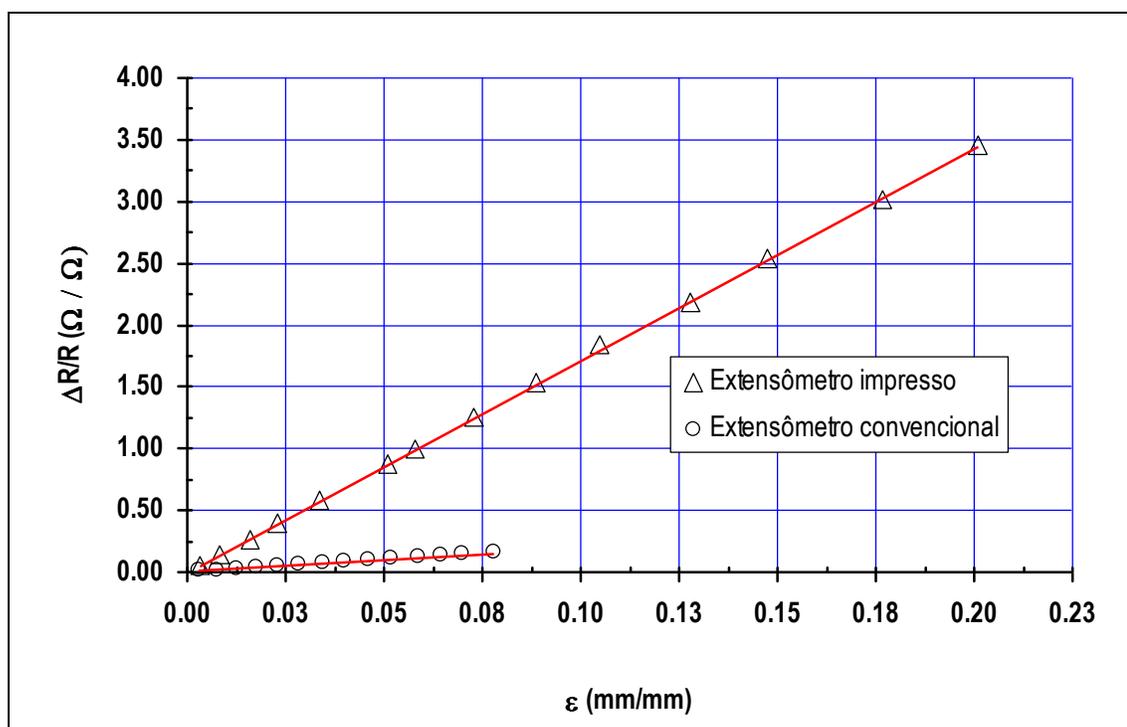


Figura 5.3 – Comparação de sensibilidades (fator K) entre o extensômetro impresso e o convencional. FONTE: Estudo de caso.

5.2 Medições para o ensaio de tração

Os testes de tração, como comentado no capítulo anterior, foram conduzidos até a ocorrência da descolagem do extensômetro convencional ou a descolagem do adesivo condutivo para fixação dos fios nos terminais do extensômetro impresso.

A Figura 4.4 apresenta o extensômetro impresso na superfície de polyamide sob esforço de tração. Cinco amostras para cada tipo de extensômetro foram testadas.

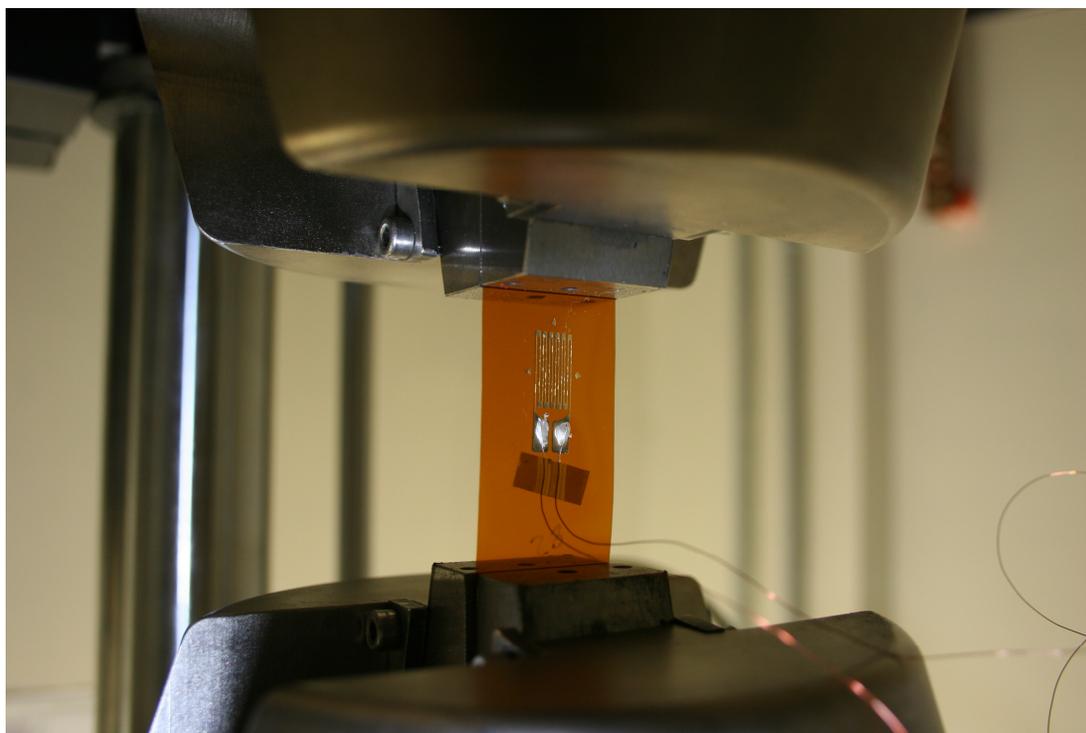


Figura 5.4 – Amostra de polyamide com extensômetro impresso sob teste de tração
FONTE: estudo de caso.

Os dados coletados por meio do sistema de aquisição, descrito previamente anteriormente no capítulo anterior, para o ensaio de tração são apresentados na Figura 4.5.

Observa-se que os dois extensômetros apresentam um comportamento similar durante os quatro primeiros segundos do teste de tração, o que corresponde a uma deformação de aproximadamente 0.02 (mm / mm). Após esta deformação os sinais começam a divergir. Isso acontece por que o substrato de polyamide começa a sofrer grandes deformações, ou seja, início do comportamento plástico.

Outro dado relevante obtido neste experimento é o fato de que o extensômetro impresso conseguiu monitorar as grandes deformações. No entanto, o adesivo condutivo usado para fixação dos fios ao terminal descolou, e com isso a aquisição foi interrompida. O mesmo comportamento é observado no extensômetro convencional, mas a descolagem acontece por volta de um segundo antes do extensômetro impresso. Para este experimento, o extensômetro convencional limitou-se a medição de 0.03 (mm / mm), enquanto o impresso a 0.05 (mm / mm).

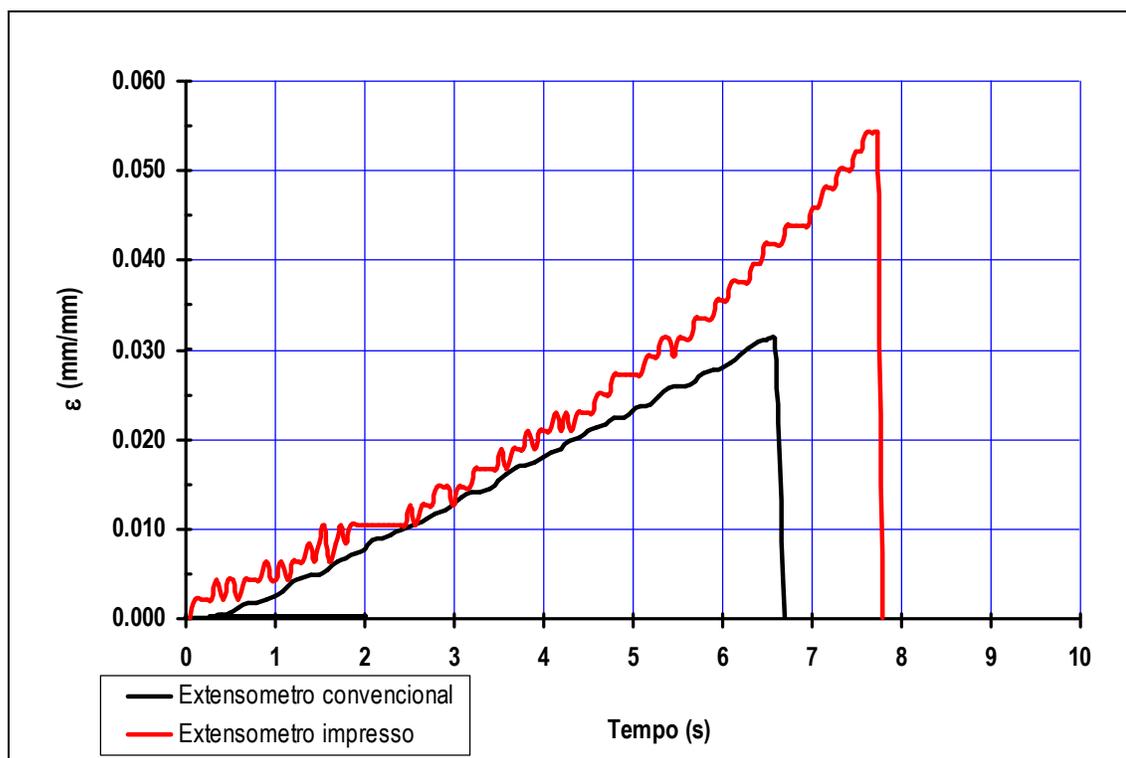


Figura 5.5 – Resultado do teste de tração óbito por meio do extensômetro impresso e convencional
 FONTE: **Estudo de caso**

5.3 Medições para o ensaio de flexão

O teste de flexão foi realizado com aplicação de uma serie de cinco ciclos de deslocamento. Estes deslocamentos cíclicos deram uma estimativa do comportamento do extensômetro impresso sob evento simultâneo de tração e compressão. A Figura 4.6 apresenta a amostra de polyamide com o extensômetro impresso sobre o dispositivo para ensaio de flexão.

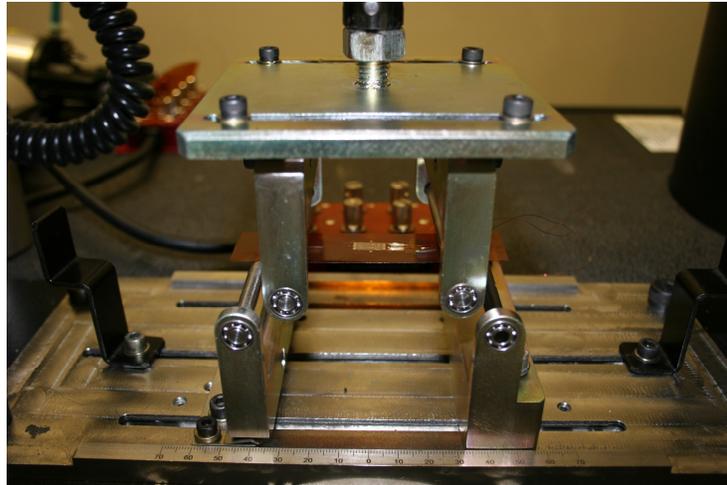


Figura 5.6 – Amostra de polyamide com extensometro impresso sob teste de flexão.
FONTE: estudo de caso.

Apresentam-se os resultados do teste de flexão de quatro pontos obtidos por meio dos extensômetros convencional e impresso. Embora a medição obtida pelo o impresso esteja com ruído (linha vermelha), a medição apresentou-se bastante similar as medições do convencional (linha preta).

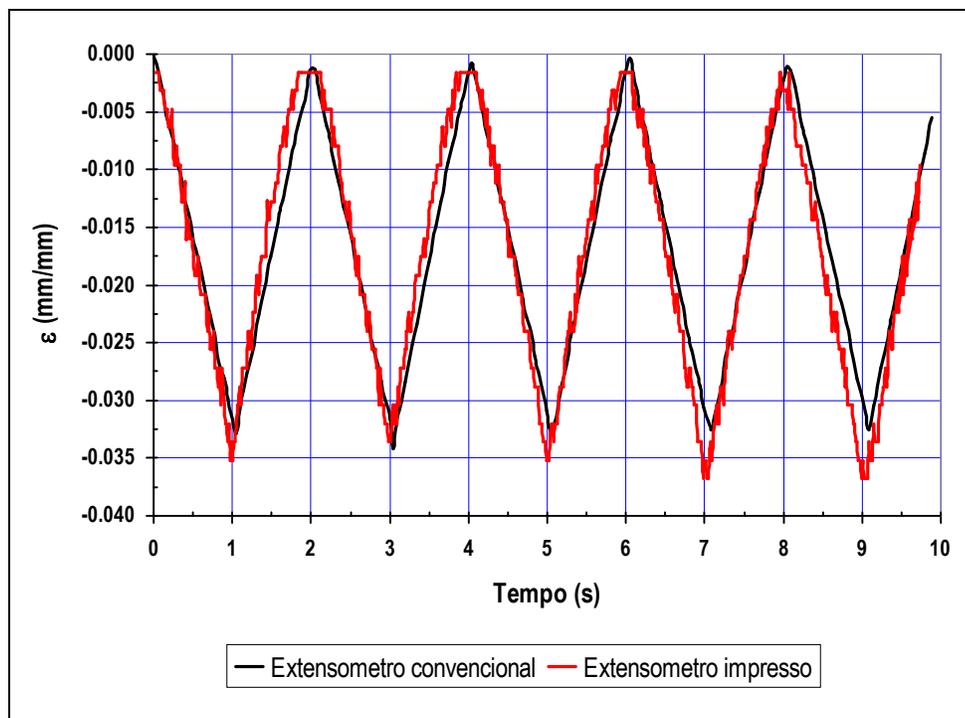


Figura 5.7 – Amostra de polyamide com extensometro impresso sob teste de tração
FONTE: estudo de caso.

6 CONCLUSÃO

A etapa de teste de conceito realizada durante o desenvolvimento de um novo produto permite avaliar a performance o seu desempenho em condições reais de uso. O que este trabalho abordou foi apenas duas das avaliações de performance que extensômetros podem estar submetidos durante o uso. No entanto, por meio destas análises foi possível verificar que o extensômetro impresso apresenta-se como uma potencial solução para os problemas freqüentemente encontrados na utilização dos extensômetros convencionais em superfície de materiais poliméricos, tais como sensibilidade e grandes deformações.

A proposta de um novo extensômetro, que foi desenvolvido por meio de impressão de nano-partículas de prata, apresentou resultados satisfatórios para uma primeira avaliação. Tanto no teste de tração quanto no teste de flexão, os resultados ficaram muito próximo aos obtidos pelo extensômetro convencional. Para as medições de deformação da polyamide quando sujeita ao teste de tração, o extensômetro impresso possibilitou medir o início da deformação plástica até a interrupção devido à descolagem dos fios aos terminais elétricos. Enquanto que o extensômetro convencional limitou-se apenas a pequenas deformações elásticas, devido ao uso da cola de cianoacrilato.

Dentre as principais vantagens que o extensômetro impresso apresenta tem-se à medição de grandes deformações, elevada sensibilidade e rápida confecção. Das desvantagens deste método, ressalta-se o custo da tinta condutiva de prata, o processo para obtenção da resistência elétrica desejada, e superfície não porosa.

Como sugestão para os próximos trabalhos, recomenda-se avaliar outras características do extensômetro impresso tais como: histereses, não-linearidade, comportamento dinâmico e calibração, além de avaliar a possibilidade impressão usando-se outros tipos de tinta condutiva.

REFERÊNCIAS

CHURCHILL, G., A. **Marketing: criando valor para o cliente**. 1ª edição. São Paulo: Editora Saraiva, 2003.

KOTLER, P. **Administração de marketing: a edição do novo milênio**. 10ª edição. São Paulo: Prentice Hall, 2000.

NUNES, M., J., L. **Metodologia de desenvolvimento de novos produtos industriais**. 2004. 327 p. Dissertação (Doutorado Engenharia da Produção). Escola de Engenharia da Universidade do Minho.

SLACK, N; CHAMBERS, S; JOHNSTON, R. **Administração da Produção**. 2ª edição. Tradução de Maria Teresa Corrêa de Oliveira e Fábio Alher. Atlas. São Paulo 2002.

Conseza. A., J., B.; **Processo de desenvolvimento de novos produtos**. PDF. [local]. 2006 [Características físicas, tipo de suporte. Notas].

MATTILA. T., T. **Accelerated Reliability Testing**. Curso: Principles of Manufacturing and Reliability. Lecture 3. 14-25 Abril de 2008. 27 p. Notas de aula. PDFI

BEER, F., P.; JOHNSTON, E., R., Jr. **Resistência dos materiais**. 1991. New York: McGraw-Hill, 1951. 387 p.

TIMOSHENKO. S., P. **Resistência dos materiais**. Editora: Livros técnicos S.A. Rio de Janeiro. 3ª edição. Volume 1. 1967

BORESI, A., P.; SCHMIDT, A., P. **Advanced mechanical of material**. 5th edition. Editora: John Wiley & Sons, Inc. Canada, 1993.

BARREIRA, L. **Introdução a extensometria: Formação no âmbito da avaliação de desempenho 2007**. Laboratório de Estruturas e Resistência dos Materiais. 2007. 12 p. PDF

PAULINO, H., L. **Curso: Aplicação de strain gauges na análise experimental de tensões em PCB's**. Julho 2007. 74 p. PDF

BARBOSA, F., S. **Introdução a extensometria**. 24 de Fevereiro de 2006. 42 p. PDF

ANDOLFATO, R., P.; CAMACHO, J., S.; BRITO, G., A. **Extensometria Básica**, Apostila Unesp – Núcleo de Ensino e Pesquisa da Alvenaria Estrutural, Ilha Solteira, São Paulo.

Frade, J. **Handbook of modern sensors: physics, designs and applications**. 3ª Edição. San Diego, California: Springer, 2004. 589 p.

Apostila de extensometria. Universidade Federal de Santa Catarina. Departamento de engenharia mecânica. Grante, Grupo de análise e projeto mecânico. Florianópolis. Julho 2004. 47 p. PDF

EXCEL Sensores. Disponível em < <http://www.excelsensor.com.br> >. Acesso em: 02 out. 2009.

Procedimento de fixação do extensometro. Catálogo fabricante de extensometro Kyowa. 8 p.

HOFFMANN, K. An **Introduction to measurement using strain gages**. 1ª edição. Alsbach. 1989, p 34.

PARK, B., K.; KIM, D.; JEONG, S.; MOON, J.; KIM, J., S. **Direct writing of copper conductive patterns by ink-jet printing**. Science direct. Korea. Jan 2007. Acesso em: 2 set. 2009

GLEITER, H. **Materials Science, and Questions of Prestige1: Invisible Origins of Nanotechnology**. Summer 2009, Vol. 17, No. 2, Pages 123-143. Posted Online April 14, 2009. By The Massachusetts Institute of Technology. 2009.

SUGANUMA, K; WAKUDA, D; HATAMURA, M. KIM, K., S. **Ink-jet Printing of Nano Materials and Processes for Electronics Applications**. Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University. Acesso em: 30 set. 2009. 4 p.

ASTM D 638 – 03. ***Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics.***
Annual Book of ASTM Standards. V.1, 2005.

ASTM D 790 – 03. ***Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials.*** V.1,
2005