

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
INSTITUTO DE FÍSICA DE SÃO CARLOS
INSTITUTO DE QUÍMICA DE SÃO CARLOS**

Carlos Alberto Rodrigues de Gouvêa

**Desenvolvimento de Laminador Para Confeção de Fios Ortodônticos
Retangulares e suas Caracterizações**

**São Carlos
2008**

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

CARLOS ALBERTO RODRIGUES DE GOUVÊA

**Desenvolvimento de Laminador Para Confeção de Fios Ortodônticos
Retangulares e suas Caracterizações**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Área de Concentração: Desenvolvimento,
Caracterização e Aplicação de Materiais
Orientador: Prof. Dr. Luiz Carlos Casteletti

**São Carlos
2008**

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTES TRABALHOS, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pelo Serviço de Biblioteca e Informação IFSC/USP

Gouvêa, Carlos Alberto Rodrigues de
Desenvolvimento de laminador para confecção de fios ortodônticos retangulares e suas caracterizações / Carlos Alberto Rodrigues de Gouvêa; orientador Luiz Carlos Casteletti.--São Carlos, 2008.
98p.

Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Interunidades Ciência e Engenharia de Materiais. Área de Concentração: Desenvolvimento, Caracterização e Aplicação de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Instituto de Física de São Carlos, Instituto de Química de São Carlos da Universidade de São Paulo.

1. Fios retangulares. 2. Ortodontia. 3. Laminador. I. Título.

Aos meus pais, Osmar e Marlene,
aos meus irmãos, Jaqueline e Marco,
aos meus amigos e a Ester, minha amada.

Agradecimentos

Ao Prof. Dr. Luiz Carlos Casteletti, pela orientação e também pela amizade.

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

Ao Dr. André Itman Filho, pela oportunidade, colaboração e ajuda durante todo o trabalho.

Aos técnicos de laboratório, Eliezer (Tico) e Silvano, pela amizade e colaboração.

Aos amigos do Departamento de Engenharia de Materiais, Aeronáutica e Automobilística, em especial ao Diogo e ao Lucas pelo auxílio durante os experimentos, companheirismo e amizade.

Aos funcionários e amigos da Tecnident, em especial ao D'amico, ao Mário e ao Valdir, pela oportunidade que me foi dada, por acreditarem em mim e pela confiança.

A minha linda Ester, por existir em minha vida, pelos momentos de alegria, pelo amor, por me fazer feliz e a pessoa mais amada na sua vida. Te amo muito viu minha linda.

Aos meus pais, Osmar e Marlene, aos meus irmãos e aos demais familiares pela educação que vocês me deram e pela formação proporcionada.

Resumo

GOUVÊA, CARLOS. A. R. (2008). Desenvolvimento de Laminador Para Confeção de Fios Ortodônticos Retangulares e suas Características. São Carlos/SP. 98p. **Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Brasil.**

Nos tratamentos ortodônticos, fios de diferentes ligas metálicas são utilizados nas etapas de alinhamento, nivelamento, correção da posição molar, fechamento espacial, acabamento e retenção. Com relação às duas últimas, responsáveis pelo posicionamento adequado dos dentes superiores sobre os inferiores, a preparação requer um fio que favoreça o torque de incisão, ou seja, que apresente grande resistência e rigidez associadas à ativação de pequeno alcance. Para este fim, os fios de aços inoxidáveis austeníticos retangulares são os preferidos em razão do módulo de elasticidade elevado e boa resistência à corrosão no meio bucal. Quanto à geometria retangular, o processo de fabricação requer desenvolvimento tecnológico adequado para a produção em escala industrial de fios com as características geométricas e propriedades mecânicas para melhor adequação às necessidades de uso. Com o objetivo de se produzir fios com tais características, foi desenvolvido um laminador para a fabricação de fios retangulares com a intuito de se dispor de uma alternativa de menor custo ao processo de produção por trefilação, de custo elevado, devido a complexidade das matrizes. Além da fabricação do laminador, foram avaliados os aspectos tecnológicos que envolveram os efeitos da deformação nas propriedades mecânicas dos fios, por meio de medidas de microdurezas e ensaios em tração e de flexão. Nos testes realizados, os fios apresentaram geometria, acabamento superficial e propriedades mecânicas adequadas à sua utilização em tratamentos ortodônticos.

Palavras-chave: Fios retangulares, Ortodontia, Laminador

Abstract

GOUVÊA, CARLOS. A. R. (2008). Development of rolling mill for rectangular orthodontic wires production and its characterization. São Carlos/SP. 98p. **Master Course – School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo, Brazil.**

In orthodontic treatments, wires of different metallic alloys are used for alignment, leveling, correction of the molar position, space closing, finish and retention. With respect to finish and retention, these wires are responsible for adequate positioning of the upper teeth on the lower teeth. Wires that are subjected to incisor torque require high resistance and stiffness. For this, wires of rectangular austenitic stainless steel are used due to high modulus of elasticity and good corrosion resistance in the oral environment. Because of the rectangular geometry, wire production requires process development suitable for industrial scale manufacture with geometric characteristics and mechanical properties better adapted to the use conditions. To obtain wires with such characteristics, a rolling mill was developed for the production of rectangular wires by a rolling process with the objective of reducing cost of the cold drawing process that is currently used, which utilize complex and expensive wire-drawing dies. In addition to the rolling process itself, wire deformation, microhardness, tension and bend tests were also performed. In these tests, wire geometry, surface finish and mechanical properties were successfully adapted for use in orthodontic treatments.

Key-Works: Rectangular wires, Orthodontic, Rolling mill.

Lista de Figuras

Figura 1:	(a) Modelo mostrando um aparelho ortodôntico. (b) Ilustração de como é produzido o torque ^[9]	18
Figura 2:	Propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis austeníticos em função do grau de deformação a frio ^[7]	28
Figura 3:	Fotografia mostrando a garra caracol, utilizada para fixação do fio durante os ensaios de tração.....	31
Figura 4:	Ilustração do ensaio de flexão.....	31
Figura 5:	Ilustração do corpo durante o ensaio de flexão.....	32
Figura 6:	Ilustração do momento fletor.....	33
Figura 7:	Processos de Conformação Mecânica ^[42]	37
Figura 8:	Zona de deformação e ângulo de contato durante a laminação ^[31]	39
Figura 9:	Esquema de forças atuantes no momento de contato (ou de entrada) do metal com os cilindros do laminador ^[46]	40
Figura 10:	Cadeira de laminação com dois rolos de trabalho ^[45]	43
Figura 11:	Ilustração esquemática de vários tipos de laminadores: (a) duo (b) duo reversível (c) trio; (d) quádruplo; (e) tipo Sendzimir e (f) contínuo ^[46]	43
Figura 12:	Desenho esquemático de uma bancada de trefilação.....	44
Figura 13:	Fluxograma mostrando como foi dividido este trabalho.....	47
Figura 14:	Diagrama esquemático dos quatro conjuntos mancal/eixo/disco.....	48
Figura 15:	Ilustração demonstrando como foram feitas as medidas das secções transversais e dos raios de curvatura dos fios como recebido e após laminado.....	51
Figura 16:	Esquema da montagem do dispositivo para os ensaios de flexão.....	52
Figura 17:	(a) Eixo, mancal e disco mostrados individualmente. (b) Conjunto eixo, mancal e disco após montagem.....	54
Figura 18:	Vistas do laminador após montagem.....	54
Figura 19:	Fio com formato irregular confeccionado usando-se tracionamento manual.....	55
Figura 20:	Vista frontal e lateral com os motorreductores fixados perpendicularmente entre si na	

base de sustentação do laminador.....	56
Figura 21: Fio confeccionado utilizando o sistema eletromecânico na laminação.....	57
Figura 22: Secção transversal dos fios confeccionados após a substituição dos eixos e rolamentos.....	58
Figura 23: Nova montagem do laminador.....	59
Figura 24: Secções transversais dos fios confeccionados utilizando-se a nova montagem do laminador.....	59
Figura 25: (a) Secção transversal do fio com diâmetro 0,45mm como-recebido. (b) Secção transversal do fio 16x16 laminado.....	60
Figura 26: (a) Secção transversal do fio com diâmetro 0,53mm como-recebido. (b) Secção transversal do fio 16x22 laminado.....	61
Figura 27: (a) Secção transversal do fio com diâmetro 0,59mm como-recebido. (b) Secção transversal do fio 17x25 laminado.....	61
Figura 28: (a) Secção transversal do fio com diâmetro 0,61mm como-recebido. (b) Secção transversal do fio 18x25 laminado.....	62
Figura 29: (a) Secção transversal do fio com diâmetro 0,62mm como recebido. (b) Secção transversal do fio 19x25 laminado.....	62
Figura 30: (a) Secção transversal do fio com diâmetro 0,65mm como recebido. (b) Secção transversal do fio 21x25 laminado.....	63
Figura 31: Gráfico da Dureza X Estado do fio.....	66
Figura 32: Gráfico da Tensão X Deformação do fio 16x16 laminado.....	67
Figura 33: Gráfico da Força X Deformação do fio 16x16 laminado.....	67
Figura 34: Gráfico da Tensão X Deformação do fio 16x16 laminado.....	68
Figura 35: Gráfico da Força X Deformação do fio 16x16 importado.....	68
Figura 36: Gráfico da Tensão X Deformação do fio 16x22 laminado.....	69
Figura 37: Gráfico da Força X Deformação do fio 16x22 laminado.....	69
Figura 38: Gráfico da Tensão X Deformação do fio 16x22 laminado.....	70
Figura 39: Gráfico da Força X Deformação do fio 16x22 importado.....	70
Figura 40: Gráfico da Tensão X Deformação do fio 17x25 laminado.....	71

Figura 41:	Gráfico da Força X Deformação do fio 17x25 laminado.....	71
Figura 42:	Gráfico da Tensão X Deformação do fio 17x25 importado.....	72
Figura 43:	Gráfico da Força X Deformação do fio 17x25 importado.....	72
Figura 44:	Gráfico da Tensão X Deformação do fio 18x25 laminado.....	73
Figura 45:	Gráfico da Força X Deformação do fio 18x25 laminado.....	73
Figura 46:	Gráfico da Tensão X Deformação do fio 18x25 importado.....	74
Figura 47:	Gráfico da Força X Deformação do fio 18x25 importado.....	74
Figura 48:	Gráfico da Tensão X Deformação do fio 19x25 laminado.....	75
Figura 49:	Gráfico da Força X Deformação do fio 19x25 laminado.....	75
Figura 50:	Gráfico da Tensão X Deformação do fio 19x25 importado.....	76
Figura 51:	Gráfico da Força X Deformação do fio 19x25 importado.....	76
Figura 52:	Gráfico da Tensão X Deformação do fio 21x25 laminado.....	77
Figura 53:	Gráfico da Força X Deformação do fio 21x25 laminado.....	77
Figura 54:	Gráfico da Tensão X Deformação do fio 21x25 importado.....	78
Figura 55:	Gráfico da Força X Deformação do fio 21x25 importado.....	78
Figura 56:	Gráfico da Força de ativação X Estado do fio.....	81
Figura 57:	Esquema da montagem do dispositivo para os ensaios de flexão, mostrando as possíveis posições dos fios durante o ensaio.....	82
Figura 58:	Gráfico da Resistência a Flexão X Estado do fio.....	83
Figura 59:	Gráfico da Resistência à Tração X Estado do fio.....	84

Lista de Tabelas

Tabela 1:	Quantidades em porcentagem de massa, dos principais constituintes dos aços inoxidáveis ^[7, 14, 23]	27
Tabela 2:	Valores de IE calculados através dos valores médios da composição em % peso, segundo Kuromoto et al. ^[28]	29
Tabela 3:	Bitolas iniciais e desejadas dos fios.....	46
Tabela 4:	Composição química dos fios de aço AISI 304 segundo American MicroSteel.....	46
Tabela 5:	Conversão de polegadas para milímetros.....	60
Tabela 6:	Valores medidos para os fios produzidos neste trabalho.....	63
Tabela 7:	Valores medidos para os fios importados.....	64
Tabela 8:	Valores de dureza Vickers para os fios produzidos neste trabalho.....	65
Tabela 9:	Valores de dureza Vickers para os fios importados.....	65
Tabela 10:	Propriedades mecânicas dos fios como-recebidos.....	79
Tabela 11:	Propriedades mecânicas dos fios laminados.....	79
Tabela 12:	Propriedades mecânicas dos fios retangulares importados.....	80

Sumário

1. Introdução.....	17
2. Objetivo.....	21
3. Revisão Bibliográfica.....	22
3.1. Etapas do Tratamento Ortodôntico.....	22
3.1.1. Alinhamento	22
3.1.2. Nivelamento.....	23
3.1.3. Correção da Posição do Molar.....	23
3.1.4. Fechamento Espacial.....	24
3.1.5. Acabamento.....	24
3.1.6. Retenção.....	25
3.2. Aços Inoxidáveis.....	25
3.2.1. Aços Inoxidáveis Austeníticos.....	27
3.3. Ensaaios Mecânicos.....	30
3.3.1. Ensaaios de Tração.....	30
3.3.2. Ensaaios de Flexão.....	31
3.4. Conformação Mecânica.....	36
3.4.1. Laminação.....	38
3.4.2. Trefilação.....	43
4. Materiais e Métodos.....	46
4.1. Montagem do Laminador.....	47
4.2. Análise Metalográfica.....	50
4.3. Medidas de Microdurezas.....	51
4.4. Ensaaios de Tração e Flexão.....	51

5. Resultados e Discussão.....	53
5.1. Montagem do laminador.....	53
5.2. Análise Metalográfica.....	60
5.3. Medidas de Microdurezas.....	64
5.4. Ensaio de tração e Flexão.....	66
6. Conclusões.....	85
Referências.....	86
Apêndice.....	91

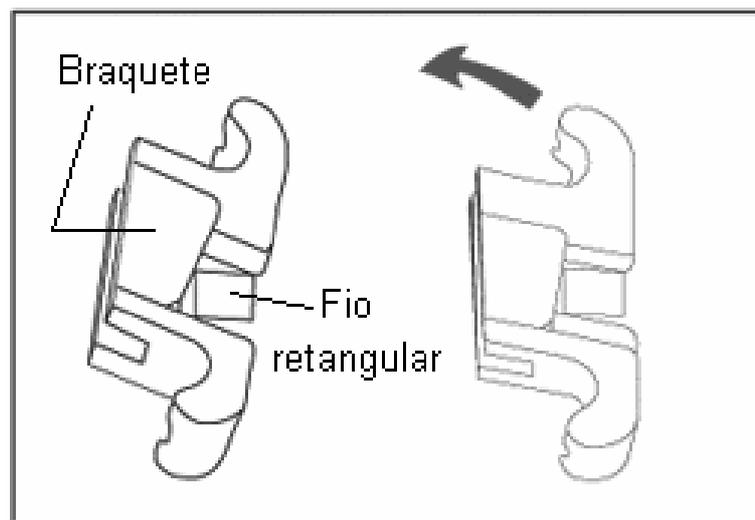
1 - Introdução

Fios de aço inoxidável AISI 304 são utilizados como biomateriais em aplicações onde é exigida alta resistência mecânica, durabilidade e resistência á corrosão em meios agressivos. Fios desse aço, com secções transversais redondas ou retangulares inferiores a 1 mm e resistências à tração superiores a 1600 MPa, são utilizados para correção ortodôntica ^[1-3]. A escolha do tipo de fio para otimizar os efeitos em cada fase do tratamento, é influenciada pelo tipo do material e pela secção transversal do mesmo. Em geral, nas fases iniciais de alinhamento e nivelamento, fios redondos confeccionados com a liga níquel-titânio (Nitinol) são os mais adequados devido à ductilidade e ao baixo modulo de elasticidade, o que permite o posicionamento progressivo do dente para a posição desejada. Caso o fio seja muito rígido pode causar maiores dores ao paciente ^[4-8].

Nas fases finais de correção da posição molar, fechamento espacial e acabamento utilizam-se fios com secções retangulares. Nestas fases é necessário produzir um torque adequado ao posicionamento do dente, para a promoção de uma boa oclusão e o aprimoramento da estética facial. A foto na Figura 1(a) mostra um modelo, onde foi montado um aparelho para correção ortodôntica utilizando-se fio retangular de aço inoxidável AISI 304. A ilustração da Figura 1(b) mostra como é produzido o torque no dente por meio do braquete utilizando-se o fio retangular.



(a)



(b)

Figura 1: (a) Modelo mostrando um aparelho ortodôntico. (b) Ilustração de como é produzido o torque ^[9].

Na fases finais do tratamento, a maioria desses fios (98%) constitui-se de aço inoxidável austenítico AISI 304, devido ao seu conjunto de propriedades favoráveis, tais como, resistência mecânica e às tensões envolvidas nos movimentos das articulações, além de biocompatibilidade, pois devem ser inertes, sem liberar produtos tóxicos no meio bucal, aliadas a um custo relativamente baixo, quando comparado a outros aços inoxidáveis biocompatíveis ^[1-3, 10].

A produção dos fios com as secções retangulares adequadas, em termos de dimensão e paralelismo entre as faces, constitui-se num grande desafio tecnológico, sendo que a nível mundial, existe um número restrito de empresas que os produzem.

No Brasil, existe apenas duas empresas revendedoras desses produtos importados. Tal fato motivou a presente pesquisa, visando o desenvolvimento de um processo de conformação para obtenção de fios, com uma combinação adequada de resistência mecânica e acabamento do produto final.

Dentre os processos de conformação dos metais, a laminação, que consiste na passagem de uma peça metálica entre dois ou mais rolos, provocando uma variação na secção transversal da mesma, devido às tensões exercidas pelos rolos, é o processo mais utilizado. A laminação a frio pode ser usada na produção de chapas, tiras e folhas com bom acabamento superficial ^[11-14].

Com o objetivo de se dispor do domínio tecnológico da produção de fios ortodônticos, tradicionalmente produzidos pelo processo de trefilação, a um custo mais baixo, neste trabalho foi projetado e construído um laminador para a produção de fios retangulares. O laminador foi construído utilizando-se quatro cilindros fixados em eixos acoplados a um mancal por rolamentos. Estes conjuntos mancal/eixo/disco foram adaptados a uma placa de metal, que serve de base para os conjuntos. Estes módulos foram posicionados na base em forma de cruz. Com esta configuração, os conjuntos podem ser movimentados nas direções, horizontal e vertical, permitindo assim o ajuste dos discos conforme as dimensões da abertura escolhida para passagem do fio, resultando conseqüentemente na bitola desejada. Levando-se em consideração a dimensão reduzida da secção do fio, foi necessária uma avaliação sistemática dos movimentos dos eixos do laminador para garantir a qualidade do processo. Assim, além da montagem do laminador com as adaptações necessárias, foram analisados os aspectos tecnológicos da geometria dos componentes, para otimizar o controle dimensional

durante a operação do equipamento, uma vez que a norma impõe restrições rigorosas quanto às características dimensionais ^[15]. O sistema além de apresentar baixo custo, permite com apenas algumas regulagens, a obtenção de um número ilimitado de secções transversais nos fios, ao contrário da trefilação, que exige matrizes específicas para cada dimensão.

No presente trabalho foram produzidos em um laminador projetado e construído para tal fim e posteriormente caracterizados, fios de aço inoxidável austenítico com secções transversais retangulares. Análises da secção final, medidas de microdurezas e ensaios em tração e flexão foram realizados para avaliar a qualidade dos fios produzidos. São também apresentadas as características dos fios importados para fins de comparação.

2 - Objetivo

Desenvolvimento e construção de um laminador regulável adequado à fabricação de fios, com secções transversais retangulares variáveis, com a qualidade exigida a aplicações ortodônticas, a partir de fios de aços inoxidáveis austeníticos com secções transversais redondas.

3 - Revisão Bibliográfica

O objetivo desta revisão bibliográfica foi dar embasamento teórico ao processo de confecção, por laminação, de fios retangulares utilizados em ortodontia e ao processo de utilização dos mesmos durante o tratamento ortodôntico. Deste modo, pretende-se estudar o aço AISI 304 quanto às suas características, constituição, aplicações, propriedades mecânicas e processos de conformação. Realiza-se também uma breve revisão sobre as etapas do tratamento ortodôntico.

3.1 - Etapas do Tratamento Ortodôntico

Os tratamentos ortodônticos podem ser divididos em seis fases e via de regra, um fio diferente é necessário em cada etapa, sendo dependente do tipo utilizado na etapa anterior. A progressão destas etapas ocorre com aumento da tensão e da rigidez dos fios. Outras variáveis como a composição química e a forma geométrica do fio podem ser otimizadas na realização destas etapas, para proporcionar aos pacientes, qualidade nos tratamentos ortodônticos [1-6, 16-18].

São apresentadas em seguida as várias etapas do processo de tratamento ortodôntico:

3.1.1 - Alinhamento

É a fase inicial do tratamento ortodôntico e tem a função de organizar os dentes para favorecer a articulação e a mordida do paciente. Se não houver espaço suficiente para os

dentes se posicionarem na gengiva, pode ocorrer o empilhamento conhecido como "crowding". O processo de alinhamento é realizado com a colocação de um arco regular circundando os dentes e fios que atuam com resistência mecânica e ductilidade altas, além de grande força de ativação. Os fios com secção circular são os mais apropriados na fase de alinhamento dos dentes ^[1-6, 16-18].

3.1.2 - Nivelamento

O nivelamento é necessário para alinhar os dentes superiores corretamente com os inferiores e pode ser acompanhado pela extração para favorecer o crescimento regular dos dentes. O nivelamento requer um fio com resistência mecânica alta associada a menor rigidez e pouca ativação. Os fios redondos também são os preferidos nesta etapa ^[1-6, 16-18].

3.1.3 - Correção da Posição do Molar

A terceira fase do tratamento é a correção da posição do molar que alinha os molares em uma configuração apropriada. Esta correção requer um fio com a especificação relativa à usada durante a fase de nivelamento e que favoreça o movimento de translação. Neste caso, os fios retangulares são os mais apropriados, pois produzem um sistema binário de forças que permite o equilíbrio do sistema (*controlled tipping*) ^[1-6, 16-18].

3.1.4 - Fechamento Espacial

A quarta fase do tratamento é o fechamento espacial, importante principalmente nos casos em que tornou-se necessária a extração para promover o alinhamento dos dentes. Esta etapa pode ser realizada de várias formas. Um método é usar um fio na forma de uma laçada (*looping*)^[1-6, 16-18].

Neste caso, o fio tende a retornar à posição original, desde que a deformação não seja permanente. É importante o efeito mola (*"springback"*) que favorece o retorno do fio à posição original quando a deflexão é inferior ao limite de escoamento^[1-6, 16-18].

Os ortodontistas utilizam um fio dobrado na forma de *"looping"* para fechar o espaço. Quando o fio é estirado para conectar dois dentes, o efeito mola faz com que os dentes movam-se em direção contrária, de forma a fechar o espaço. Nesta etapa, o fio apropriado deve proporcionar resistência mecânica e rigidez elevadas com menor alcance de ativação. O fio retangular é o preferido, pois permite um melhor dobramento além do melhor controle da posição da raiz durante a translação dos dentes^[1-6, 16-18].

3.1.5 - Acabamento

O objetivo do acabamento é alinhar os dentes na configuração próxima à ideal e proporcionar o efeito estético do tratamento. O fio ideal é o que favorece o torque de incisão com um ângulo adequado para evitar a movimentação dos dentes. Fios retangulares trançados para favorecer o binário de rotação dos dentes são os mais indicados^[1-6, 16-18].

As fases do acabamento incluem:

- paralelismo da raiz para assegurar que os dentes fiquem espaçados uniformemente;

- torque incisivo para que os dentes frontais fiquem ligeiramente deslocados;
- correção de relações verticais para que os dentes dianteiros superiores sobreponham os inferiores;
- correção da linha média para que os dentes dianteiros superiores fiquem paralelos com os inferiores;
- assentamento para ajustar os dentes à nova mordida ^[1-6, 16-18].

3.1.6 - Retenção

É a fase final do tratamento. Considerando-se que os dentes foram movidos para corrigirem uma má oclusão dental, a finalidade da retenção é estabilizar a configuração nova sem que os dentes retornem à posição original. A retenção é realizada por meio de um retentor que fixa os dentes na nova orientação. É uma fase especial e requer um fio com grande resistência e rigidez, associada a um pequeno alcance de ativação. O fio redondo é o preferido porque nenhum movimento de torção é desejado ^[1-6, 16-18].

3.2 - Aços Inoxidáveis

Aços inoxidáveis podem ser definidos como o grupo de ligas ferrosas resistentes à corrosão, que contenham no mínimo 12% de cromo. Tal resistência se deve principalmente a presença de cromo, que a partir de um determinado valor e em contato com o oxigênio, permite a formação de uma película finíssima de óxido de cromo sobre a superfície do aço, conhecida como camada passiva, que por sua vez é auto-regenerativa, impermeável e

insolúvel em vários meios corrosivos. Em alguns aços inoxidáveis a quantidade de cromo pode alcançar 30% ^[19, 20].

Em alguns casos outras características além da resistência à corrosão são necessárias para utilização dos mesmos em determinadas aplicações, sendo então acrescentados outros elementos de ligas, como níquel, molibdênio, nióbio, cobre, silício, alumínio e titânio, para que o aço atenda a essas características. Estes elementos de liga podem ser acrescentados em proporções que caracterizam a estrutura e propriedades mecânicas do aço inoxidável. O níquel, quando adicionado no aço inoxidável, provoca uma mudança na estrutura cristalina do material que por sua vez apresenta melhores características de ductilidade, resistência mecânica a quente, soldabilidade e resistência a corrosão de uma maneira geral. O molibdênio e o cobre geralmente aumentam a passividade e a resistência à corrosão nos ácidos sulfúrico e sulfuroso. O silício e o alumínio melhoram a resistência à oxidação em altas temperaturas. O titânio e nióbio são elementos estabilizadores nos aços inoxidáveis, impedindo o empobrecimento de cromo via precipitação em forma de carbonetos durante aquecimento e/ou resfriamento lento em torno de 700°C, que provocaria uma diminuição da resistência local à corrosão (sensitização) ^[12, 20-23].

Os aços inoxidáveis são geralmente classificados em cinco grupos, de acordo com a composição química e microestrutura básica presentes, sendo: Austeníticos, Ferríticos, Martensíticos, Duplex e Endurecíveis por precipitação. Na Tabela 1 são apresentadas as composições químicas de cada liga e os principais aços inoxidáveis de cada classe ^[7, 14, 23].

Tabela 1: Quantidades em porcentagem de massa, dos principais constituintes dos aços inoxidáveis [7, 14, 23].

Classe	Austenítico		Duplex		Martensíticos		Endurecíveis por precipitação		Ferríticos	
	304	316*	329	2304	410	420	15-5PH	17-4PH	430	439
C	0,08	0,08	0,08	0,03	0,15	0,15	0,07	0,07	0,12	0,07
Cr	19,00	17,00	23,00	21,50	12,50	13,00	15,00	16,5	17,00	18,00
Cu	-	-	-	-	-	-	3,50	4,00	-	-
Mo	-	-	1,00	0,05	-	-	-	-	-	-
Mn	2,00	2,00	-	-	1,00	1,00	-	-	1,25	1,00
N	-	-	-	0,05	-	-	-	-	-	-
Ni	9,00	12,50	2,50	3,00	-	-	4,50	-	-	-
Si	1,00	1,00	-	-	1,00	1,00	-	-	1,00	1,00
S	0,03	0,03	-	-	0,03	0,03	-	-	0,03	0,03
P	0,04	0,04	-	-	0,03	0,03	-	-	0,04	0,03
Nb + Ta	-	-	-	-	-	-	0,45	0,45	-	-

* possui 3% de molibdênio em sua composição

3.2.1 - Aços Inoxidáveis Austeníticos

Os aços inoxidáveis austeníticos são os mais comuns entre os aços inoxidáveis, sendo caracterizados pela boa resistência à corrosão, elevada tenacidade e boa soldabilidade. A estrutura austenítica (CFC), é estabilizada à temperatura ambiente pela adição de níquel e outros elementos estabilizadores desta estrutura, como o manganês e o nitrogênio. Não podem ser endurecidos por tratamento térmico, mas sua resistência à tração e dureza podem ser aumentadas por encruamento. Não são ferromagnéticos [24-30].

Após a deformação a frio do aço AISI 304, parte da energia utilizada na deformação é armazenada no material na forma de defeitos cristalinos, tais como: defeitos puntiformes, defeitos de empilhamento e discordâncias, sendo delas a maior contribuição. A alta

plasticidade e a capacidade de encruamento desse aço permite que ele seja trabalhado a frio até atingir valores excepcionais de limites de escoamento e de resistência, como indicado na Figura 2 ^[7, 24-30].

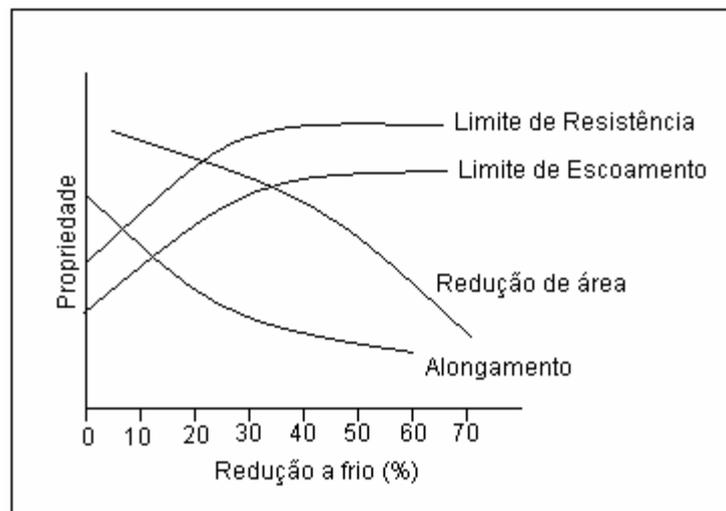


Figura 2: Propriedades mecânicas dos inoxidáveis austeníticos em função do grau de deformação a frio ^[7].

Esta grande capacidade de deformação permite, também, conformações severas, sendo que neste aspecto os aços inoxidáveis com estrutura austenítica (CFC) são praticamente insuperáveis ^[24-30].

A deformação a frio pode ser uma alternativa para o aumento da resistência. Uma outra característica importante desse aço é a sua suscetibilidade às transformações martensíticas induzidas por deformação a frio. A transformação da austenita em martensita está ligada à estabilidade da austenita determinada pela presença de vários elementos químicos. Para os aços austeníticos os principais elementos estabilizadores da austenita são Mn, Ni e C. Estes elementos são denominados gamagênicos por ampliarem o campo austenítico. Como em geral, o teor de manganês é fixo em 2%, o níquel, o carbono e o nitrogênio tornam-se os principais elementos estabilizadores da austenita. Post e Eberly ^[24-30],

usando técnicas de permeabilidade magnética, desenvolveram uma fórmula empírica que permite determinar o índice de estabilidade (IE) destes materiais, dada por:

$$IE = (\%Ni) + 0,5(\%Mn) + 35(\%C) - 0,083(\%Cr + 1,5(\%Mo) - 20)^2 - 15 \quad (1)$$

Assim, materiais que possuam IE positivo, são considerados estáveis quanto às transformações de fase martensíticas. Materiais que possuem IE negativo são instáveis sendo tão mais suscetíveis a tais transformações quanto mais negativo for o valor de IE. A Tabela 2 mostra os valores de IE para alguns aços austeníticos ^[24-30].

Quanto à transformação martensítica, o aço inoxidável austenítico AISI 304 pode ser classificado em austenítico estável e austenítico metaestável. O austenítico estável é o que retém estrutura austenítica, mesmo após considerável deformação a frio. O austenítico metaestável transforma a estrutura para martensita, quando sujeito à deformação a frio. Esta diferença manifesta-se claramente na curva tensão-deformação do material e é a causa do aparecimento do comportamento magnético em peças de aços austeníticos do tipo AISI 304 conformados a frio ^[31-35].

Tabela 2: Valores de IE calculados por meio dos valores médios da composição em % peso, segundo Kuromoto et al. ^[28].

Aço Inoxidável (AISI)	Índice de estabilidade (IE)
304L	-5,6
304	-5,3
316	0,8
310	16,9

Portando o tipo de aço escolhido neste trabalho, por apresentar uma estrutura cristalina do tipo CFC, possui excelentes valores de resistência ao impacto, resistência a tração e não

sofrem transição dúctil-frágil, sendo, portanto, os mais indicados para serviços criogênicos ou quando a garantia de tenacidade em qualquer trabalho é fundamental ^[30-33].

3.3 - Ensaio Mecânicos

A determinação das propriedades mecânicas de um material metálico é realizada por meio de vários ensaios. Geralmente são destrutivos, pois promovem a ruptura ou a inutilização do material. Existem ainda os ensaios não-destrutivos, utilizados para determinação de algumas propriedades físicas do metal, bem como para detectarem falhas internas dos mesmos. Na categoria dos ensaios destrutivos, estão classificados os ensaios de tração, dobramento, flexão, torção, fadiga, impacto, compressão e outros. O ensaio de dureza que, em certos casos não inutiliza a peça ensaiada, também está incluído nessa categoria. Neste trabalho serão usados apenas os ensaios destrutivos, mais precisamente os ensaios de tração e flexão, os quais foram realizados em fios ortodônticos ^[36-38].

3.3.1 - Ensaio de Tração

Utilizou-se nos ensaios de tração fios de aço inoxidável do tipo AISI 304, com secções transversais redondas e retangulares. Para a fixação dos mesmos na máquina de ensaios foi utilizado um tipo de garra especial a qual pode ser vista na Figura 3. Esta garra é denominada caracol.



Figura 3: Fotografia mostrando a garra caracol, utilizada para fixação do fio durante os ensaios de tração.

3.3.2 - Ensaio de Flexão

O ensaio de flexão é realizado em materiais frágeis, como o ferro fundido, alguns aços, estruturas de concreto e outros materiais, que em seu uso são submetidos a situações onde o principal esforço é o de flexão.

Na Figura 4 pode ser visto o esquema de um corpo de prova apoiado em suas duas extremidades. O corpo está submetido a ação de uma força F , que age na direção perpendicular ao eixo do corpo [5, 36-38].

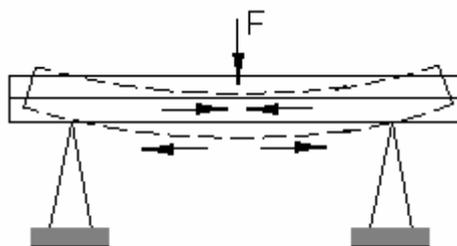


Figura 4: Ilustração do ensaio de flexão.

A força F leva uma região dos corpos a se contrair, devido à compressão enquanto que outra região se alonga, devido à tração. Entre a região que contrai e a que alonga fica uma linha que mantém sua dimensão inalterada a chamada linha neutra. Em materiais homogêneos costuma-se considerar que a linha neutra fica a igual distância das superfícies externas inferiores e superiores do corpo ensaiado, conforme está demonstrado na Figura 5 [5, 36-38].

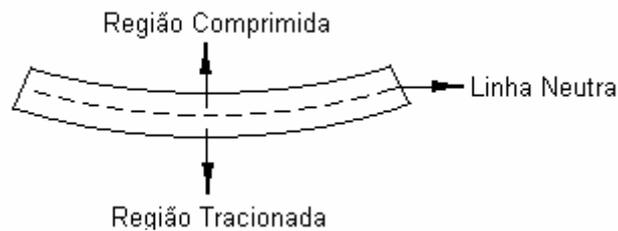


Figura 5: Ilustração do corpo durante o ensaio de flexão.

Quando esta força provoca somente uma deformação elástica no material, trata-se de um esforço de flexão. Quando produz uma deformação plástica, tem-se um esforço de dobramento [5, 36-38].

Isso significa que flexão e dobramento são etapas diferentes da aplicação de um mesmo esforço, sendo a flexão associada à fase elástica e o dobramento à fase plástica [5, 36-38].

Em algumas aplicações, envolvendo materiais de alta resistência, é muito importante conhecer o comportamento do material quando submetido a esforço de flexão. Nesses casos, o ensaio é interrompido do final da fase elástica e são avaliadas as propriedades mecânicas dessa fase [5, 36-38].

O ensaio de flexão utiliza uma montagem adaptada à uma máquina universal de ensaios. Esses ensaios podem ser feitos em corpos de prova ou em produtos, preparados de acordo com normas técnicas específicas [5, 36-38]. No caso deste trabalho os corpos são fios de aço inoxidável do tipo AISI 304 cortados com 50 mm de comprimento. Um esquema da montagem utilizada pode ser visto na Figura 17.

O ensaio de flexão fornece dados que permitem avaliar diversas propriedades mecânicas dos materiais, tais como tensão de flexão, momento fletor, momento de inércia e módulo de resistência da secção transversal. Para entender como é calculada a tensão de flexão, é necessário saber o que vem a ser momento fletor ^[5, 36-38].

Considere-se uma barra apoiada em dois pontos (Figura 6). Se for aplicado um esforço próximo a um dos apoios, a flexão da barra será pequena. Mas, se for aplicado o mesmo esforço no ponto central da barra, a flexão será máxima.

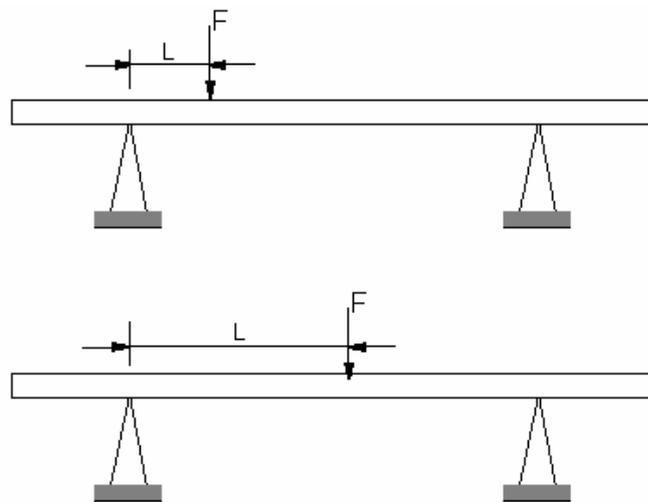


Figura 6: Ilustração do momento fletor.

Verifica-se que a flexão da barra não depende só da força, mas também da distância entre o ponto onde a força é aplicada e ponto de apoio. O produto da força pela distância do ponto de aplicação da força ao ponto de apoio origina o que chamamos de momento, que no caso da flexão é o momento fletor (M_f) ^[5, 36-38].

Nos ensaios de flexão, a força é sempre aplicada na região média do corpo de prova e se distribui uniformemente pelo mesmo. Na fórmula para calcular o momento fletor, considera-se a metade do valor da força (F) e a metade do comprimento útil do corpo de prova (L). Portanto a fórmula para calcular o momento fletor é ^[5, 36-38]:

$$M_f = \frac{F}{2} \times \frac{L}{2} \Rightarrow M_f = \frac{FL}{4} \quad (2)$$

Um outro elemento importante é o momento de inércia da secção transversal. O momento de inércia está relacionado com a forma do material. O momento de inércia (J) é calculado por formulas matemáticas e variam de acordo com a secção transversal do corpo de prova: [5, 36-38].

- Momento de inércia para corpo com secção circular:

$$J = \frac{\pi D^4}{64} \quad (3)$$

- Momento de inércia para corpo com secção retangular:

$$J = \frac{b \times h^3}{12} \quad (4)$$

O próximo elemento para entender a fórmula de cálculo da tensão de flexão é o módulo de resistência da secção transversal, representado convencionalmente pela letra W. Trata-se de uma medida de resistência em relação a um momento. Este módulo significa para a flexão, o mesmo que a área da secção transversal significa para a tração [5, 36-38].

O valor deste módulo é conhecido dividindo-se o valor do momento de inércia (J) pela distância da linha neutra à superfície do corpo de prova (c), de acordo com a equação 12.

$$W = \frac{J}{c} \quad (5)$$

Nos corpos de prova com secções circulares a distância c equivale à metade do diâmetro. Em corpos com secção retangular ou quadrada, considera-se a metade do valor da espessura ^[5, 36-38].

Dispondo-se de todos os elementos necessários para o cálculo da tensão de flexão, pode-se definir matematicamente a tensão da flexão na seguinte equação:

$$TF = \frac{M_f}{W} \quad (6)$$

Substituindo-se na equação 06 a equação 02 e a equação 05 tem-se:

$$TF = \frac{FLc}{4J} \quad (7)$$

Uma vez realizado o ensaio, para calcular a tensão de flexão basta substituir as variáveis da fórmula pelos valores conhecidos. O valor da carga obtido no ensaio varia conforme o material seja dúctil ou frágil. No caso de materiais dúcteis, considera-se a força obtida no limite de elasticidade. Quando de trata de materiais frágeis, considera-se a força registrada no limite de ruptura ^[5, 36-38].

3.4 - Conformação Mecânica

Uma das principais razões da importância atribuída aos metais na tecnologia moderna é sua capacidade de serem deformados, atingindo as formas desejadas, tais como tubos, barras, fios e chapas finas. Por outro lado, a deformação dos metais, e em particular dos aços, conduz a significativas alterações em suas propriedades ^[39-44].

A conformação mecânica tem, portanto, dois efeitos principais: dar forma ou alterar propriedades mecânicas ou características do material. Existem centenas de processos para deformar e conformar metais. Entretanto, eles podem ser divididos em poucos grupos, de acordo com os tipos de forças aplicadas durante a deformação ^[39-44].

- Processos de compressão direta;
- Processos de compressão indireta;
- Processos de tensão;
- Processos de dobramento;
- Processos de cisalhamento.

Nos processos de compressão direta, a força é aplicada na superfície da peça e o metal alonga-se em direção perpendicular ao sentido da força. Os dois principais tipos são o forjamento e laminação, que representam a maior tonelagem de aço deformado mecanicamente. Esses dois tipos e os outros principais existentes são esquematizados na Figura 7. ^[39-44].

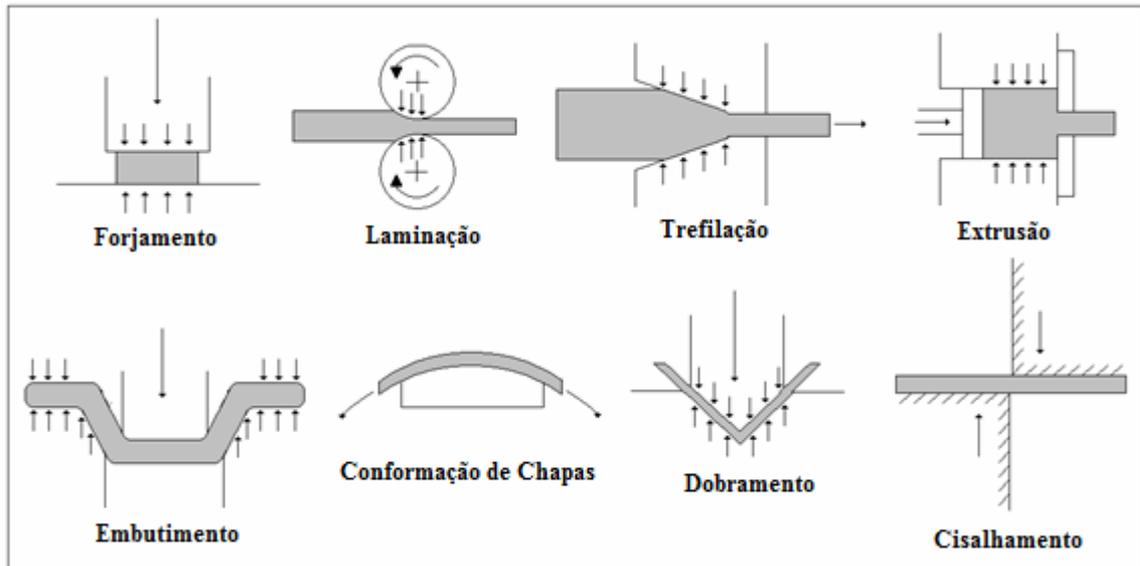


Figura 7: Processos de Conformação Mecânica ^[42].

Os processos de compressão indireta incluem trefilação, extrusão e embutimento. Nestes processos, a força direta é, frequentemente, trativa, mas as tensões compressivas desenvolvidas pela reação matriz-peça atingem elevados valores. Assim, o metal se deforma sob efeito de um estado de tensões combinado que inclui elevada compressão em pelo menos uma das direções principais ^[39-44].

A variável que permite uma classificação mais coerente dos processos de conformação – no que diz respeito a características do produto – é a temperatura em que o processo ocorre.

Os processos de conformação são classificados, basicamente, em trabalho a quente e trabalho a frio. No trabalho a quente a deformação ocorre sob condições de temperatura e taxa de deformação que permitem a recuperação e recristalização rápida, ocorrendo simultaneamente com a deformação ou entre etapas (passes) de conformação. Por outro lado, a deformação a frio se passa em condições em que os processos de recuperação-recristalização não ocorrem ^[39-44].

Em linhas gerais, processos que se passam acima de $0,5 T_f$ (onde T_f é o ponto de fusão do metal em K) são processos de deformação a quente, para taxas de deformação usuais ^[39-44].

No trabalho a frio, ocorre o encruamento do material, e sua resistência aumenta e a ductilidade diminui ^[39-44].

Os mecanismos de encruamento envolvem o aumento da densidade de discordâncias (defeitos de linha microscópicos, responsáveis pela deformação dos metais) e a diminuição de sua mobilidade. A Figura 2 apresenta a variação típica das propriedades mecânicas com a deformação a frio. Em função da deformação a frio, pode aparecer, também, anisotropia de propriedades. Em contraste com o trabalho a quente, a anisotropia, neste caso, pode ser eliminada por tratamento térmico que restaure a microestrutura original do material ^[39-44].

Como a ductilidade diminui com o progresso da deformação, pode ocorrer ruptura antes de se atingir as dimensões finais desejadas, se a deformação for excessiva ^[39-44].

Para evitar estas dificuldades, as operações de deformação a frio, em geral, são realizadas em etapas, com operações de recozimento intermediárias. Apesar do aumento do custo envolvido, tais operações permitem uma elevada flexibilidade, na medida em que possibilitam a produção de material com diversos graus de encruamento e, conseqüentemente, diferentes propriedades mecânicas ^[39-44].

Nesta revisão foi abordada de forma sucinta somente o processo de laminação e trefilação, ambos a frio, já que estes processos são os únicos relacionados a este trabalho.

3.4.1 - Laminação

Na laminação o metal é forçado a passar entre dois cilindros, girando em sentidos opostos, com a mesma velocidade superficial, distanciados entre si a uma distância menor que o valor da espessura da peça a ser deformada ^[45, 47] (Figura 10). Ao passar entre os cilindros, o

metal sofre deformação plástica, a espessura é reduzida e o comprimento e a largura são aumentados ^[45, 47].

As diferenças entre a espessura inicial e a final, da largura inicial e final e do comprimento inicial e final, chamam-se respectivamente: redução total, alargamento total e alongamento total e podem ser expressas por: $\Delta h = h_0 - h_1$, $\Delta b = b_1 - b_0$ e $\Delta l = l_1 - l_0$ ^[45, 47].

Nas condições normais, o resultado principal da redução de espessura do metal é o alongamento, visto que o seu alargamento é relativamente pequeno e pode ser desprezado ^[45, 47].

Nas Figuras 8 e 9 mostra-se, respectivamente, a zona de deformação e as forças atuantes no momento do contato do metal com os cilindros de laminação ^[47].

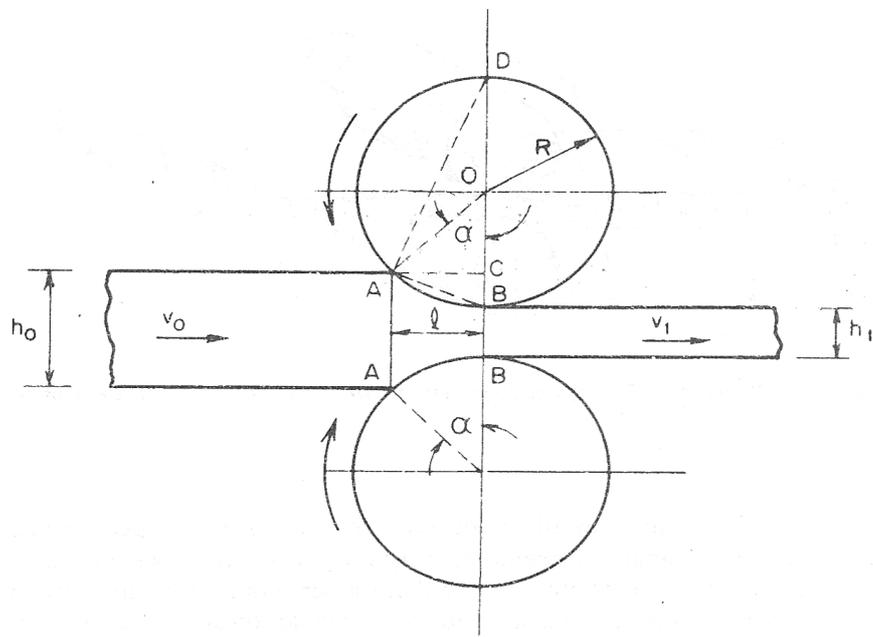


Figura 8: Zona de deformação e ângulo de contato durante a laminação ^[46].

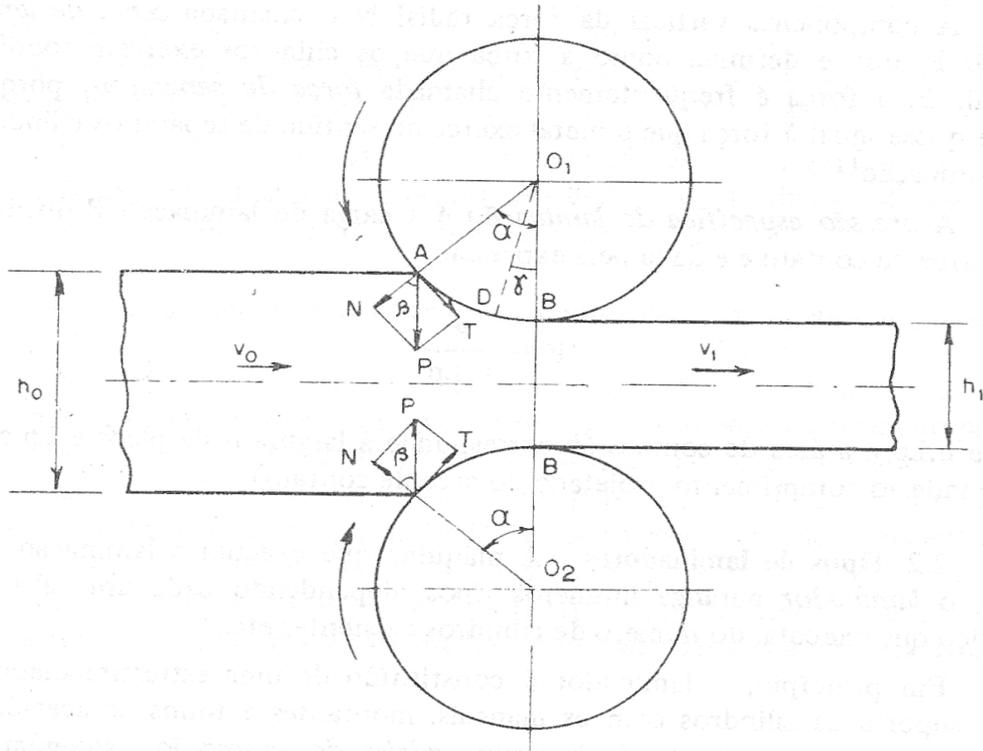


Figura 9: Esquema de forças atuantes no momento de contato (ou de entrada) do metal com os cilindros do laminador ^[46].

Cada cilindro entra em contato com metal segundo o arco AB (Figura 8), que se chama arco de contato. A esse arco corresponde o ângulo chamado ângulo de contato ou de ataque. Chama-se zona de deformação a zona à qual corresponde o volume de metal limitado pelo arco AB, pelas bordas laterais da placa sendo laminada e pelos planos de entrada e saída do metal dos cilindros ^[45, 47].

O ângulo de contato é dado pela fórmula:

$$\cos \alpha = 1 - \frac{h_0 - h_1}{2R} \quad (8)$$

O ângulo de contato se relaciona com a redução $(h_0 - h_1)$ e o diâmetro $2R$ dos cilindros. O metal, de espessura h_0 , entra em contato com os cilindros no plano AA (Figuras 8 e 9) à velocidade v_0 e deixa os cilindros, no plano BB, com a espessura reduzida para h_1 ^[45, 47].

Admitindo que não haja alargamento da placa, a diminuição da altura ou espessura é compensada por um alongamento, na direção da laminação. Como devem passar, na unidade de tempo, por um determinado ponto, iguais volumes de metal, pode-se escrever ^[45, 47]:

$$b_0 h_0 v_0 = bhv = bh_1 v_1 \quad (9)$$

onde b é a largura da placa e v a velocidade a uma espessura intermediária entre h_0 e h_1 .

Para que um elemento vertical da placa permaneça indeformado, a equação 10 exige que a velocidade na saída v_1 seja maior que a velocidade de entrada v_0 . Portanto, a velocidade da placa cresce da entrada até a saída. Ao longo da superfície ou arco de contato, entre os cilindros e a placa, ou seja, na zona de deformação, há somente um ponto onde a velocidade periférica V dos cilindros é igual à velocidade da placa. Esse ponto é chamado ponto neutro ou ponto de não deslizamento e o ângulo central, γ é chamado de ângulo neutro (Figura 9) ^[46].

A Figura 9 mostra que duas forças principais atuam sobre o metal, quer na entrada, quer em qualquer ponto da superfície de contato. Essas forças são: uma força normal ou radial N e uma força tangencial T , também chamada força de atrito ^[45, 47].

Entre o plano de entrada AA e o ponto neutro D , o movimento da placa é mais lento que o da superfície dos cilindros e, a força de atrito atua no sentido de arrastar o metal entre os cilindros. Ao ultrapassar o ponto neutro D , o movimento da placa é mais rápido que o da superfície dos cilindros. Assim, a direção da força de atrito inverte-se, de modo que sua tendência é opor-se à saída da placa de entre os cilindros ^[45, 47].

A componente vertical da força radial N é chamada de carga de laminação P , que é definida como a força que os cilindros exercem sobre o metal. Essa força é frequentemente chamada de força de separação, porque ela é quase igual à força que o metal exerce no sentido de separar os cilindros de laminação ^[45, 47].

A pressão específica de laminação é a carga de laminação P dividida pela área de contato e é dada pela expressão

$$P_{\text{Esp}} = \frac{P}{bL_p} \quad (10)$$

onde bL_p é a área de contato (b corresponde à largura b da placa e L_p corresponde ao comprimento projetado de arco de contato) ^[45, 47].

Existem vários tipos de laminadores, dependendo cada um deles do serviço que executa, do número de cilindros existentes e etc ^[45, 47].

Em princípio, o laminador é constituído de uma estrutura metálica que suporta os cilindros, com os mancais, montantes e todos os acessórios necessários. Esse conjunto é chamado cadeira de laminação, esquematicamente representada na Figura 10 ^[45].

Pelas condições de trabalho, a classificação dos laminadores é mais ampla. De fato, por esse critério, os laminadores podem ser classificados em a quente e a frio, dependendo da temperatura de trabalho do metal: se superior ou inferior à temperatura de recristalização do metal ^[45, 47].

Dentro dessas duas categorias de laminadores, estão incluídos os seus vários tipos, em função do produto que está sendo laminado, do número de cilindros, do seu diâmetro, da disposição das cadeiras e etc ^[45, 47].

Os tipos mais comuns estão representados na Figura 11.

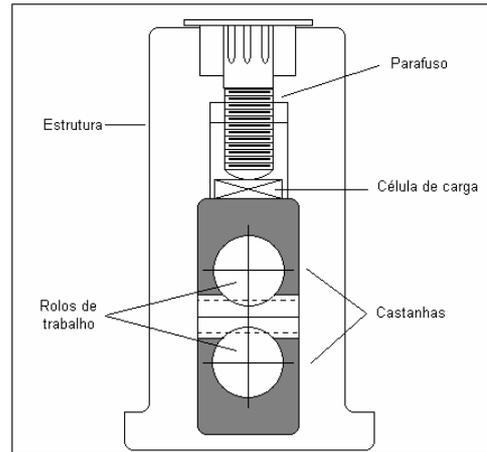


Figura 10: Cadeira de laminação com dois rolos de trabalho ^[45].

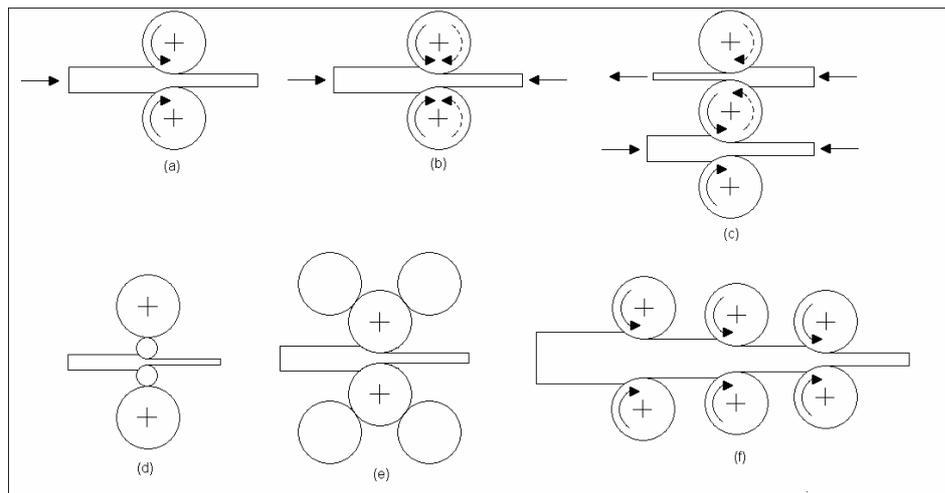


Figura 11: Ilustração esquemática de vários tipos de laminadores: (a) duplo (b) duplo reversível (c) trio; (d) quádruplo; (e) tipo Sendzimir e (f) contínuo ^[45].

3.4.2 - Trefilação

A trefilação permite um bom acabamento superficial e tolerâncias dimensionais muito estreitas podem ser obtidas em produtos longos com secções transversais constantes. Na trefilação, um produto previamente laminado, extrudado ou fabricado com uma secção

transversal sólida ou oca é puxado através de uma matriz (fieira) a uma velocidade relativamente alta, conforme ilustra a Figura 12 ^[45, 47].

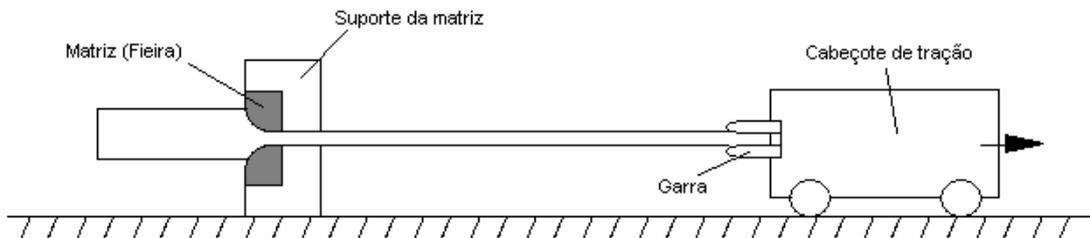


Figura 12: Desenho esquemático de uma bancada de trefilação ^[45].

Na trefilação de fio de aço ou alumínio, por exemplo, velocidades de saída de milhares de metros por minuto são comuns. A geometria da fieira determina as dimensões finais. Trefilação é normalmente realizada à temperatura ambiente usando um número de passes ou reduções através de fieiras consecutivas. Algumas vezes, o recozimento pode ser necessário após um certo número de passes de trefilação, antes da continuação da operação. A deformação é conseguida pela combinação de tensões de tração e compressão que são criadas pela força de puxamento na saída da fieira, pelo esforço contrário de recuo provocado pela força de puxamento da fieira anterior e pela configuração da mesma ^[45, 47].

Para aumentar a vida das fieiras, estas são normalmente fabricadas com carboneto sinterizado ou diamante, especialmente na trefilação de fios de pequenos diâmetros em altas velocidades. A geometria da fieira é basicamente cônica, com uma forma de sino na entrada para promover a lubrificação da fieira ^[45].

Cada dimensão de fio a ser produzido requer uma fieira específica. Portanto, a possibilidade de produzir fios com qualquer bitola pelo processo de laminação, utilizando um laminador com um simples ajuste dos cilindros, resulta numa redução acentuada dos custos de fabricação.

No presente trabalho foi desenvolvido de acordo com a metodologia a seguir, um laminador ajustável, adequado a essa produção de fios.

4 – Materiais e Métodos

O material utilizado para os testes de laminação foram fios de aço inoxidável AISI 304 trefilados com secções transversais redondas diversas, selecionadas de acordo com as secções retangulares desejadas após a laminação (Tabela 3). A composição química conforme a American Micro Steel, fornecedora do fio, pode ser observada na Tabela 4.

Também foram utilizados fios de aço inoxidável AISI 304 com secções transversais retangulares adquiridos fora do Brasil (importados). Para fins de comparação os fios importados foram adquiridos nas dimensões que desejamos produzir neste trabalho.

Tabela 3: Bitolas iniciais e desejadas dos fios.

Diâmetro inicial (mm)	Dimensões desejadas (mm)
0,45	0,405x0,405
0,53	0,405x0,559
0,59	0,432x0,635
0,61	0,457x0,635
0,62	0,483x0,635
0,65	0,533x0,635

Tabela 4: Composição química dos fios de AISI 304 segundo American Micro Steel.

%	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	N
Elemento	0,03	0,40	1,720	0,045	0,020	18,820	10,150	0,230	0,32	0,035

Este trabalho foi dividido em três fases conforme fluxograma da Figura 13. Na primeira fase (fase 1), o laminador foi construído. Na fase 2 os fios com secções transversais redondas (Tabela 3) e os fios importados com secções transversais retangulares, foram

submetidos a testes metalográficos e mecânicos. Na fase 3 os fios com secções transversais redondas foram laminados para a obtenção das secções retangulares e submetidos a testes metalográficos e mecânicos.

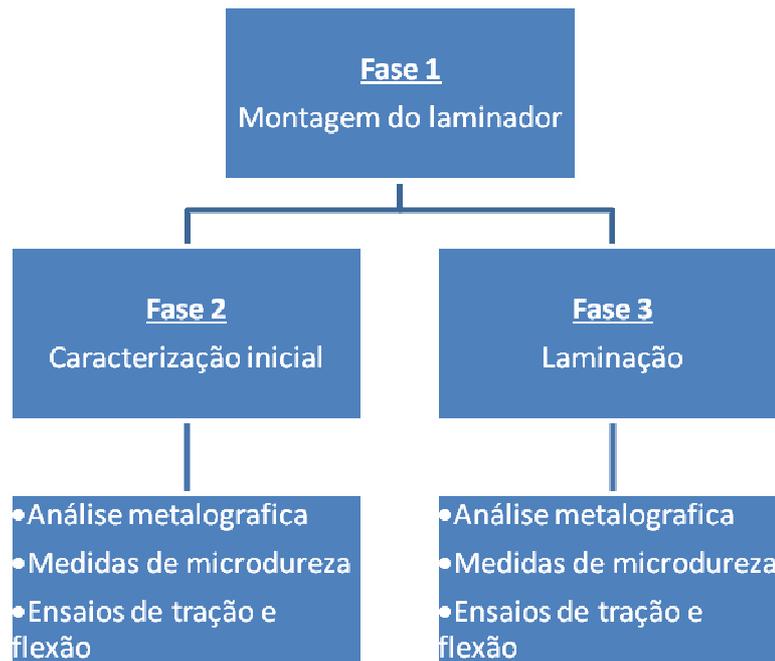


Figura 13: Fluxograma mostrando como foi realizado este trabalho.

4.1 - Montagem do Laminador

O laminador foi projetado com quatro discos adaptados a um eixo, acoplados a mancais fixados em uma placa. O desenho esquemático dos conjuntos pode ser visto na Figura 14. O posicionamento dos módulos em forma de cruz permite a movimentação dos conjuntos nas direções horizontal e vertical. Com esta configuração torna-se possível o ajuste dos discos conforme as dimensões da abertura escolhida para passagem do fio, o que resulta conseqüentemente na obtenção da bitola desejada.

Todos os custos relacionados às despesas de projeto e construção do laminador foram pagos pela Tecnident Equipamentos Ortodônticos Ltda.

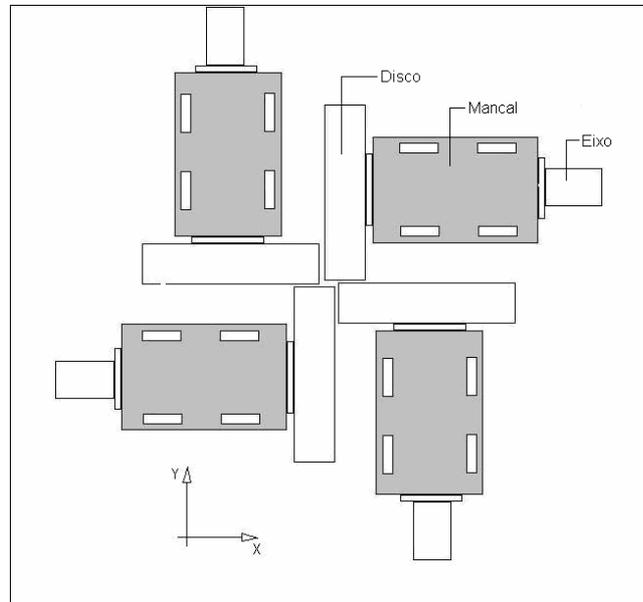


Figura 14: Diagrama esquemático dos quatro conjuntos mancal/eixo/disco.

São apresentados em seguida os vários testes realizados durante a montagem do laminador e as modificações necessárias a adequação do mesmo.

→ *TESTE 1*

Fios com diâmetro de 0,53 mm foram laminados por meio de tracionamento manual, sendo a força para movimentação dos discos avaliada com um dinamômetro. Este teste foi necessário para se conhecer as características do equipamento e definir o modelo e a capacidade do sistema eletromecânico para movimentar os discos de laminação.

→ *TESTE 2*

Analisando os testes com tracionamento manual, o sistema eletromecânico para movimentar os discos foi projetado com instalação de dois motorreduzores perpendiculares entre si na base principal. Cada motorreductor foi acoplado a um eixo com sistema de transmissão por polias de alumínio e correia de borracha. Foram utilizadas polias com 90 e 150 mm de diâmetro para reduzir a rotação dos discos de laminação para 20 rpm. A movimentação destes dois discos é responsável pelo arraste dos outros dois em consequência das forças compressivas resultantes da passagem do fio na abertura do laminador. Os testes de laminação foram realizados após a instalação dos motorreduzores.

→ *TESTE 3*

Após análise dos resultados dos testes utilizando o sistema eletromecânico para movimentação dos discos de laminação, as ações corretivas propostas foram a de confeccionar novos eixos e substituir os rolamentos blindados por cônicos para reduzir a vibração do equipamento. Após as substituições dos eixos e dos rolamentos foi realizado um novo teste de laminação.

→ *TESTE 4*

Mesmo após a substituição dos rolamentos e eixos foi observada vibração dos conjuntos assentados nas placas de regulagem. Como ações corretivas foram confeccionados

novos mancais e placas de regulagem, sendo que desta vez o foi utilizado uma retifica no acabamento final para reduzir as folgas de montagem. A área de fixação dos mancais nas placas de regulagem e estas na base de sustentação foram aumentadas, para minimizar a vibração do equipamento. Uma nova base de maior espessura também foi confeccionada. Para garantir a simetria das peças, estas operações foram realizadas fixando as peças em um centro de usinagem. Novos testes foram realizados após implementar as modificações mencionadas acima.

4.2 - Análise Metalográfica

Para a observação dos aspectos e dimensões das secções transversais após a laminação as amostras foram embutidas transversalmente à direção de laminação, e em seguida lixadas com a seqüência de lixas de 120 a 2000 mesh e polidas com diamante até a granulometria de 1 μ m. A aquisição de imagens foi feita em um microscópio óptico equipado com uma câmera CCD, ligada a um microcomputador que coordena o sistema.

As medidas das secções transversais dos fios foram feitas usando-se o programa de análise de imagens Axio Image. Na Figura 15 está demonstrado como foram feitas as medidas das secções transversais e dos raios de curvatura dos fios como recebido e laminado. Na figura estão representados as secções transversais dos fios como recebidos e laminados. As linhas L1, L2..., representam as linhas traçadas pelo programa durante as medições das arestas. Os círculos R1, R2..., representam os círculos que utilizados pelo programa para medir o quanto os cantos dos fios estão arredondados (raios de curvatura). Os valores obtidos são uma média de 4 medidas.

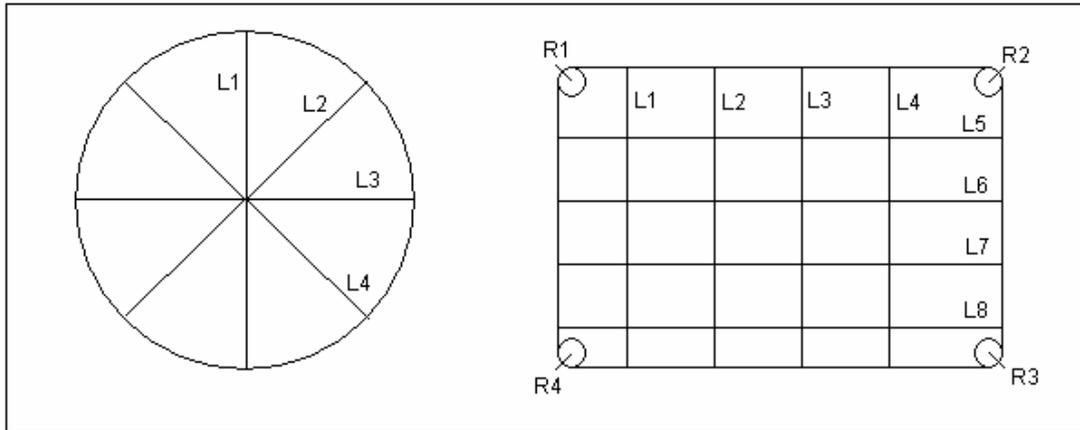


Figura 15: Ilustração demonstrando como foram feitas as medidas das secções transversais e dos raios de curvatura dos fios como recebido e após laminado.

4.3 - Medidas de Microdurezas

Devido às dimensões reduzidas das secções transversais dos fios, o método utilizado para medir a dureza dos fios foi a microdureza Vickers. As medidas de microdurezas foram obtidas em um equipamento BUEHLER, modelo MICROMET- série 2100, As medidas de microdurezas foram obtidas seguindo a norma ASTM E384-97 ^[48]. A carga utilizada no ensaio foi de 200 gf.

4.4 - Ensaio de Tração e Flexão

Para analisar o efeito da deformação nos fios, antes e após a laminação, foram realizados ensaios para obter o limite de resistência à tração e a resistência a flexão. Para a realização dos ensaios de tração, os fios ortodônticos, com comprimento de 1 m, foram fixados a uma garra caracol, projetada para este tipo de ensaio (Figura 4) . Foram realizados 5 ensaios para cada tipo de fio metálico. Para os testes de flexão em três pontos, os fios foram

cortados com 25 mm. A distância entre os pontos da base é 12 mm, e a distância entre os pontos inferiores e ponto superior é 6 mm, conforme Figura 16. Essa é aproximadamente a distância entre os braquetes no tratamento ortodôntico ^[49]. A resistência a flexão foi calculada utilizando-se as equações presentes no tópico 3.3.2.

Os ensaios de tração foram realizados de acordo com as normas ASTM ^[50].

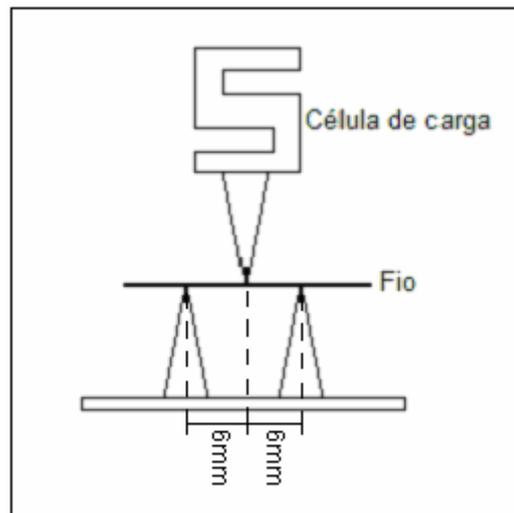
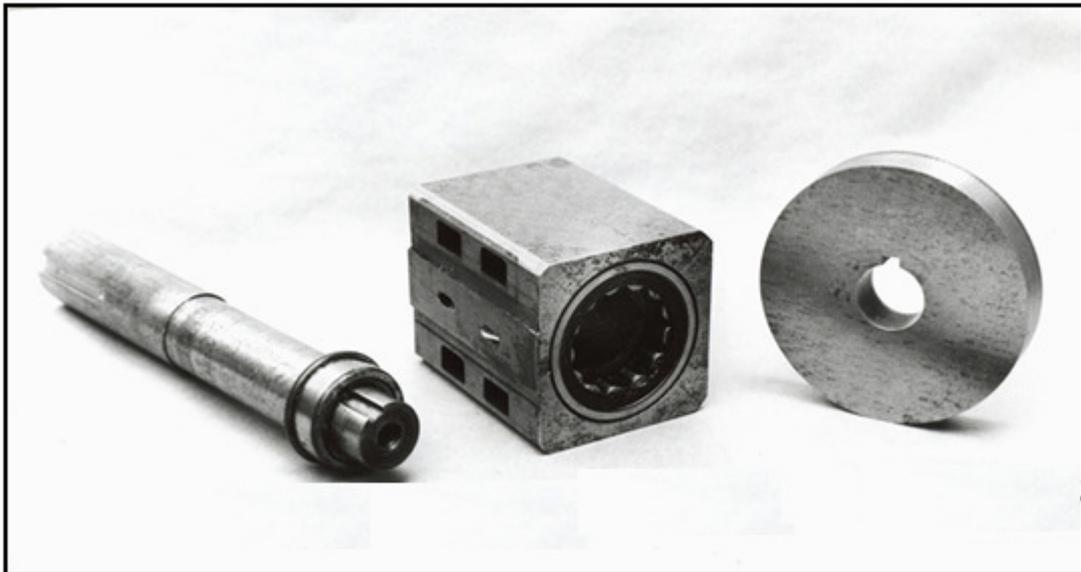


Figura 16: Esquema da montagem do dispositivo para os ensaios de flexão.

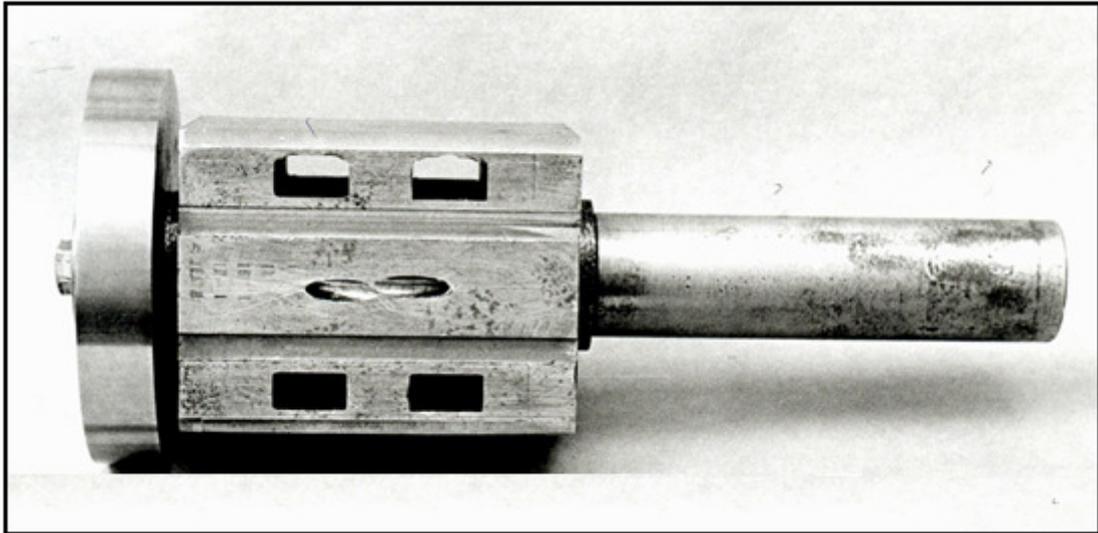
5 – Resultados e Discussão

5.1. Montagem do laminador

Após a confecção dos componentes, o laminador protótipo foi construído adaptando-se quatro conjuntos mancal/eixo/disco em quatro placas de regulagem fixadas em uma base de sustentação presa à uma estrutura feita com cantoneiras de aço carbono. As Figuras 17 e 18 mostram os componentes, eixo, mancal, disco e o laminador.



(a)



(b)

Figura 17: (a) Eixo, mancal e disco mostrados individualmente. (b) Conjunto eixo, mancal e disco após montagem.

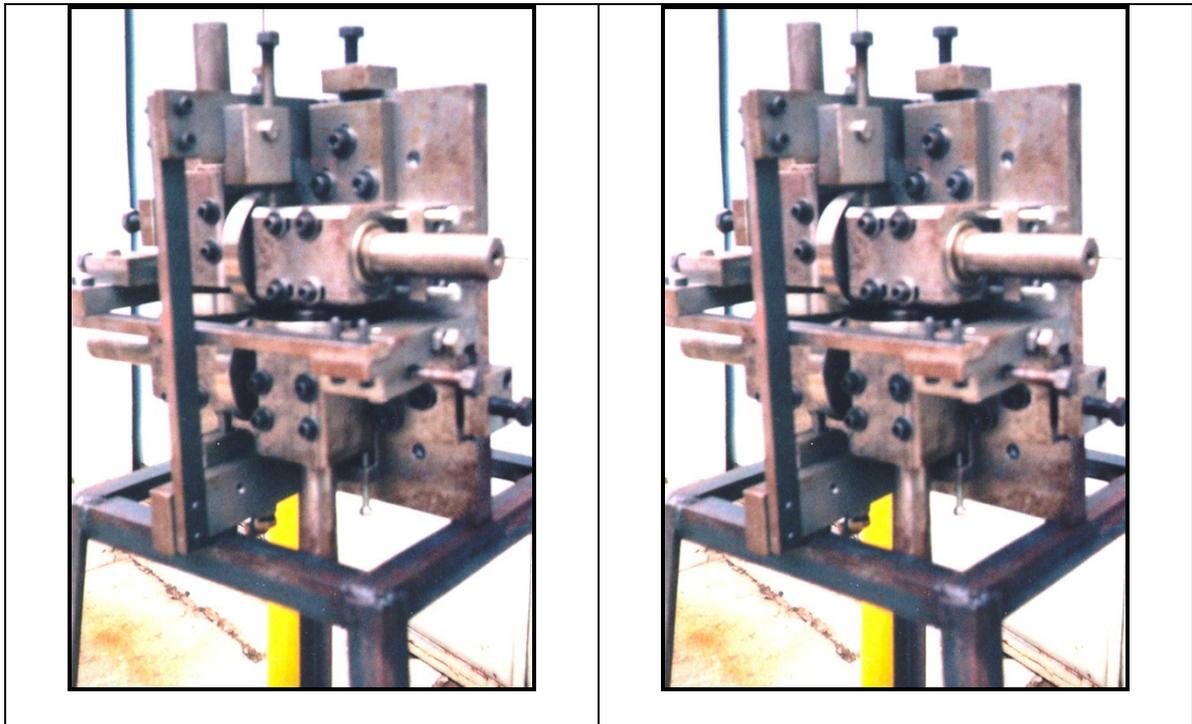


Figura 18: Vistas do laminador após montagem.

Foram realizados vários testes para avaliar os esforços de laminação, definir o sistema eletromecânico para movimentação dos discos e aperfeiçoar o ajuste dos conjuntos na base de sustentação.

→*TESTE 1*

Após o teste com tracionamento manual dos fios foi observado que a precisão do ajuste dos conjuntos não era suficiente para manter os discos de laminação assentados entre si, de tal forma a manter a abertura da secção retangular. A força para movimentar os discos foi avaliada por meio de um dinamômetro e a partir deste resultado foi projetado o sistema eletromecânico capaz de movimentar os quatro eixos. Os fios laminados apresentaram geometrias irregulares similar à mostrada na Figura 19.

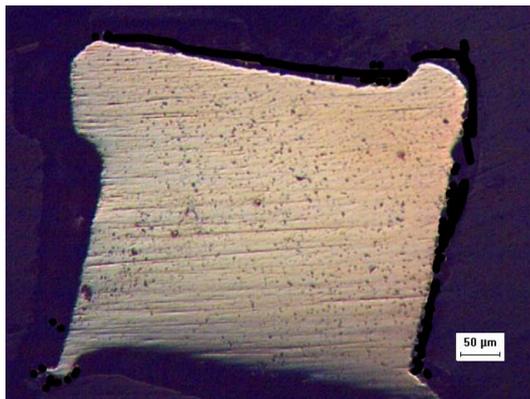


Figura 19: Fio com formato irregular confeccionado usando-se tracionamento manual.

→ *TESTE 2*

Após os testes iniciais, o sistema eletromecânico para acionamento dos discos foi fixado na base de sustentação do laminador. A Figuras 20 mostra o sistema eletromecânico adaptado ao laminador. Com a utilização dos motorreductores para acionar os discos foi possível observar uma leve vibração dos conjuntos nas placas de regulagem. Após análise dimensional dos componentes foi observado que as tolerâncias dimensionais dos eixos eram inadequadas para fixação dos rolamentos. Uma amostra característica dos fios laminados neste teste está mostrada na Figura 21. Apesar da irregularidade dimensional dos fios ficou constatado que a configuração do sistema eletromecânico apresentou capacidade e velocidade efetiva para laminação e conforme os cálculos efetuados a quantidade prevista é de 280 metros fios/hora. Em razão do efeito vibratório durante o processo, foi proposta como medida corretiva, a confecção de novos eixos e a substituição dos rolamentos blindados por cônicos, que são mais adequados para suportar grandes esforços.

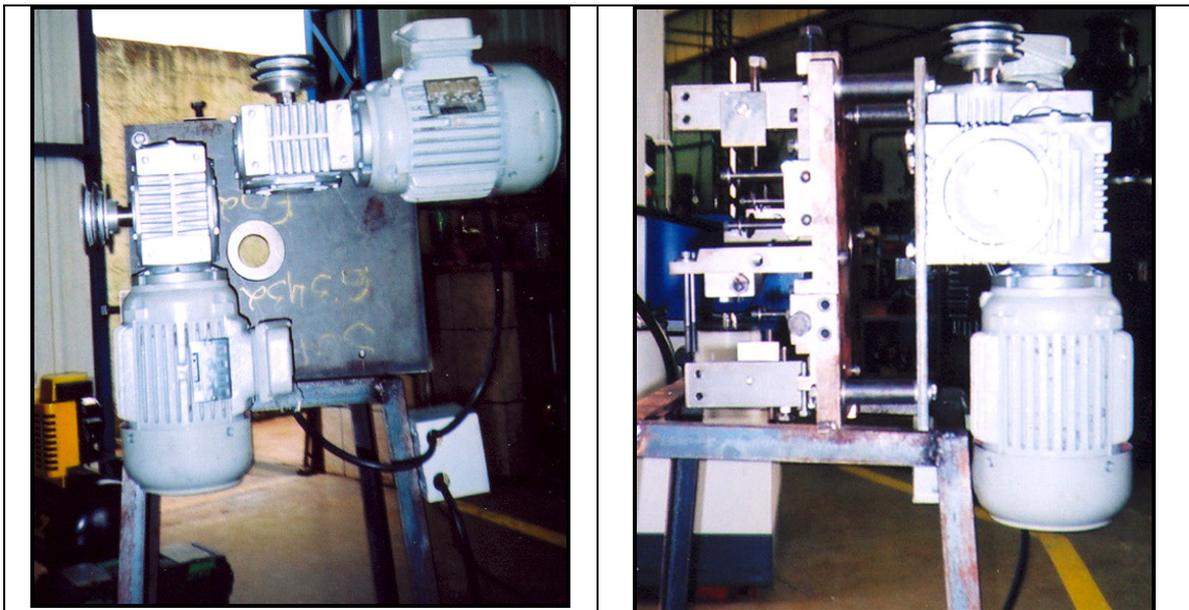


Figura 20: Vista frontal e lateral com os motorreductores fixados perpendicularmente entre si na base de sustentação do laminador.

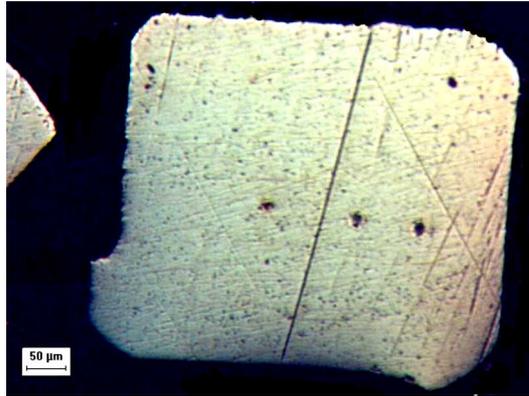


Figura 21: Fio confeccionado utilizando o sistema eletromecânico na laminação.

→ *TESTE 3*

Com a confecção de novos eixos e a troca dos rolamentos reduziu-se a vibração do equipamento, mas ainda foram observadas irregularidades na secção transversal do fio como pode ser visto na Figura 22. A geometria final apresentou uma descontinuidade típica da falta de paralelismo entre os discos. Uma análise sistemática dimensional por meio de relógio comparador revelou que a soma dos desvios da montagem dos quatro conjuntos nas placas de regulagem e destas na base de sustentação provocaram uma diferença aproximada de 0,1 mm no assentamento dos discos. Como ação corretiva foi proposta a confecção de novos mancais e placas de regulagem com acabamento em retífica para reduzir as folgas de montagem dos conjuntos.

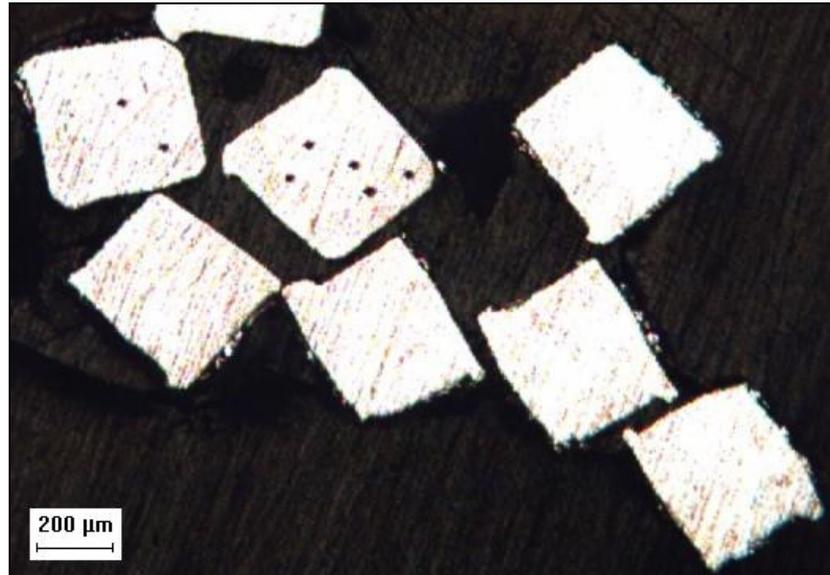


Figura 22: Secções transversais dos fios confeccionados após a substituição dos eixos e rolamentos.

→ *TESTE 4*

Após a troca dos mancais, das placas de regulagem e base de sustentação, conforme pode ser visto na Figura 23, foram feitos novos testes de laminação. As amostras dos fios laminados utilizando a nova montagem podem ser vistas na Figura 24. Estes novos resultados comprovaram a qualidade do equipamento para a fabricação de fios retangulares.

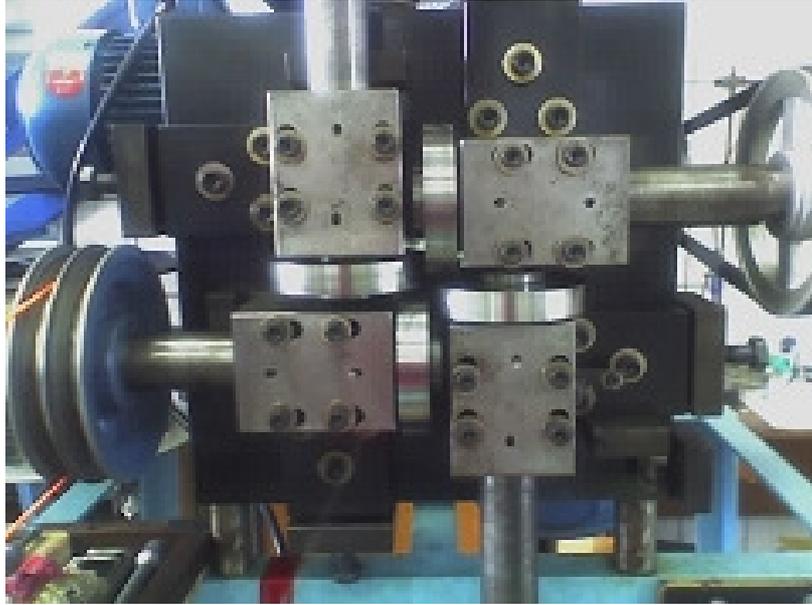


Figura 23: Nova montagem do laminador.

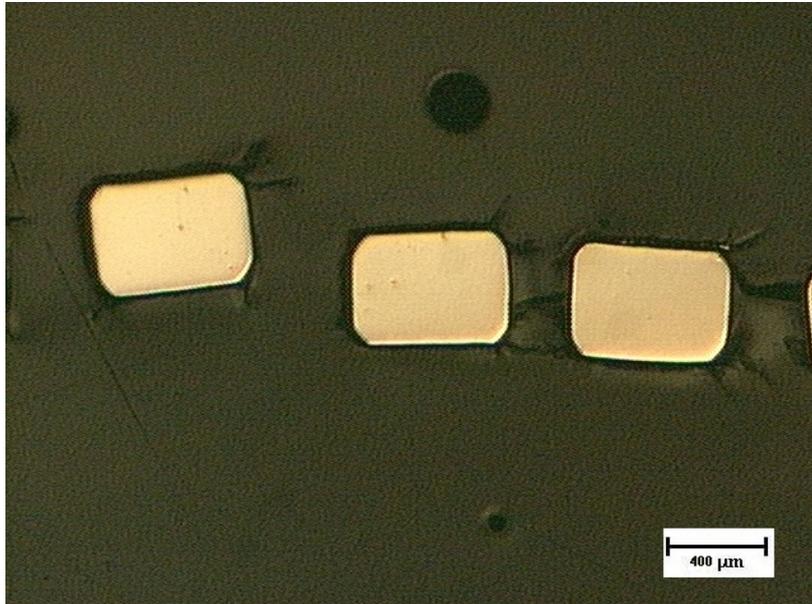


Figura 24: Secções transversais dos fios confeccionados utilizando-se a nova montagem do laminador.

5.2 - Análise Metalográfica

Nas Figuras de 25 a 30 são apresentados os aspectos das secções transversais dos fios produzidos com secções transversais variadas. As identificações dos fios, por exemplo 16 x 16 referem-se as dimensões dos mesmos em milésimos de polegada, ou seja, 0,016 x 0,016". Na Tabela 5 estão presentes as conversões de polegadas para milímetros para cada fio. As Tabelas 6 e 7 mostram respectivamente os valores medidos para os fios produzidos neste trabalho e para os fios importados produzidos por trefilação e usados para comparação.

Tabela 5: Conversão de polegadas para milímetros.

Valores em polegadas	Valores em milímetros
0,016x0,016	0,406x0,406
0,016x0,022	0,406x0,559
0,017x0,025	0,432x0,635
0,018x0,025	0,457x0,635
0,019x0,025	0,483x0,635
0,021x0,025	0,533x0,635

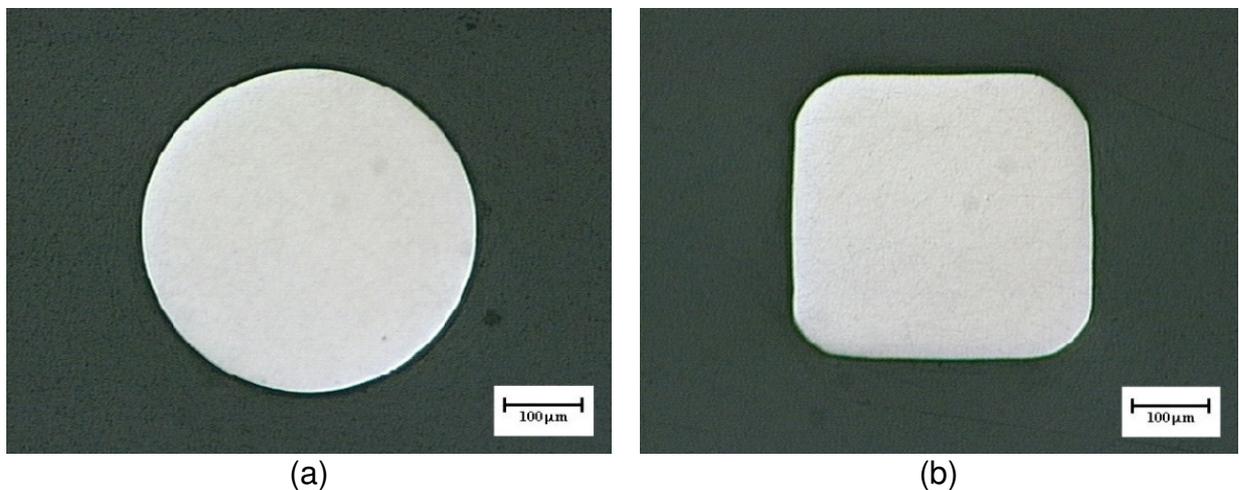
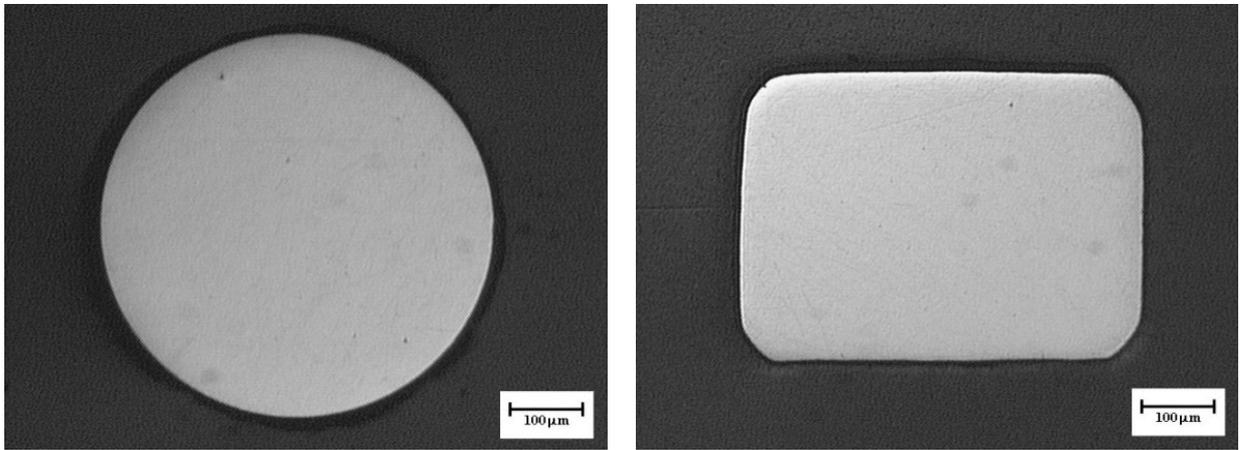


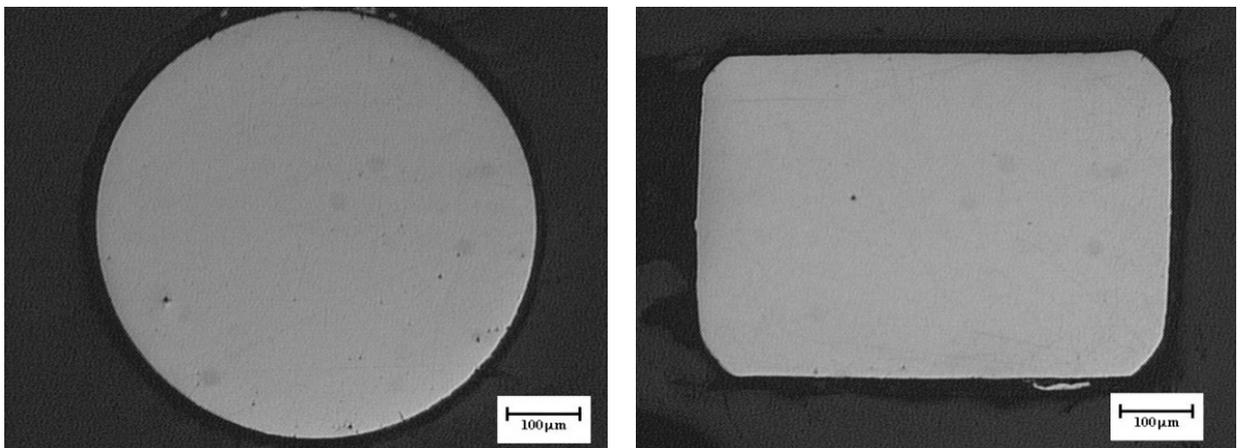
Figura 25: (a) Secção transversal do fio com diâmetro 0,45 mm como recebido. (b) Secção transversal do fio 16x16 laminado.



(a)

(b)

Figura 26: (a) Secção transversal do fio com diâmetro 0,53 mm como recebido. (b) Secção transversal do fio 16x22 laminado.



(a)

(b)

Figura 27: (a) Secção transversal do fio com diâmetro 0,59 mm como recebido. (b) Secção transversal do fio 17x25 laminado.

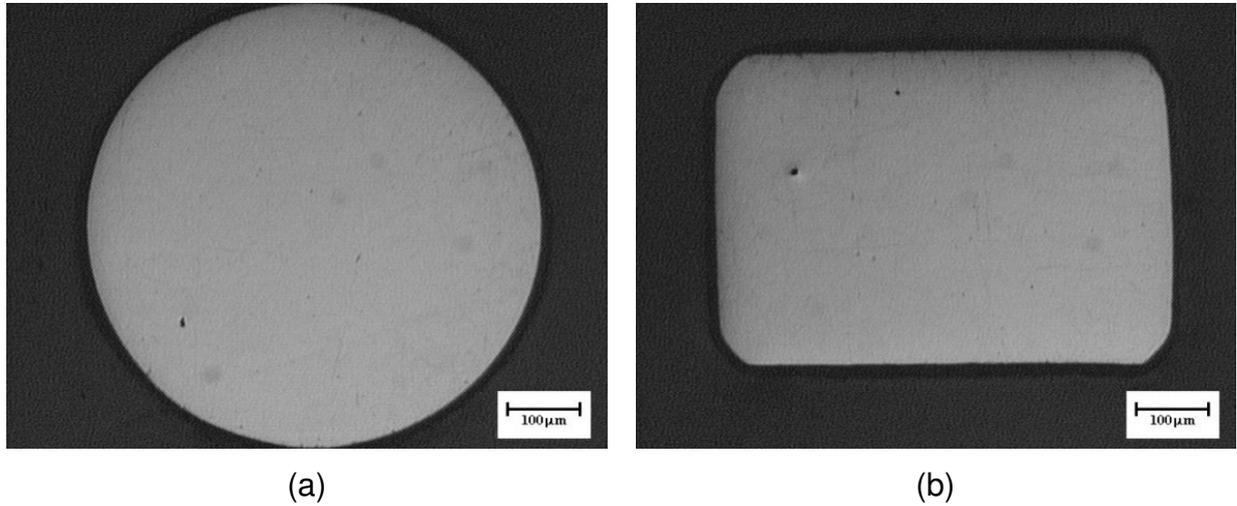


Figura 28: (a) Secção transversal do fio com diâmetro 0,61 mm como recebido. (b) Secção transversal do fio 18x25 laminado.

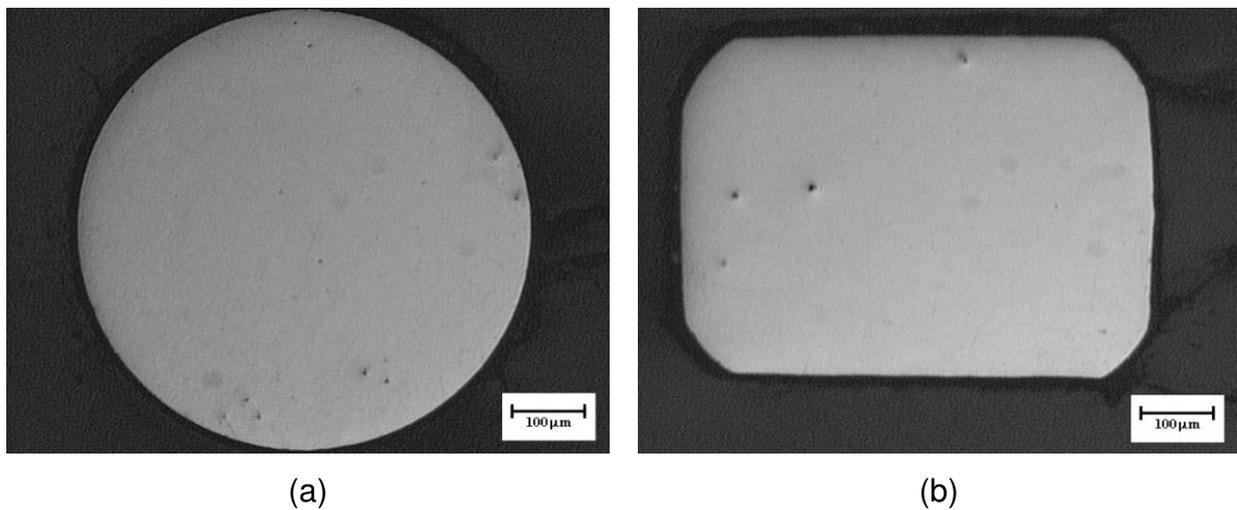


Figura 29: (a) Secção transversal do fio com diâmetro 0,62 mm como recebido. (b) Secção transversal do fio 19x25 laminado.

Tabela 7: Valores medidos para os fios importados.

Fio	16x16	16x22	17x25	18x25	19x25	21x25
Aresta do fio laminado (mm)	0,396x0,399	0,404x0,566	0,434x0,634	0,472x0,627	0,457x0,659	0,525x0,638
Raio de curvatura (mm)	0,69	0,62	0,51	0,50	0,50	0,52

Para a análise da qualidade do fio produzido, utilizou-se as medições de acordo com a Figura 15. Por meio das Figuras de 25 a 30 verifica-se o bom desempenho do laminador construído, uma vez que as seções transversais dos fios laminados assemelham-se as dos fios importados; semelhança essa que é comprovada comparando-se os valores dimensionais presentes nas Tabelas 6 e 7 para as arestas e raios de curvatura dos fios laminados e importados.

As variações dimensionais das arestas está dentro da faixa estipulada pela norma ^[10], a qual permite uma variação de $\pm 0,01$ mm, por exemplo o fio retangular 16x16 (Figura 24), pode variar entre 0,395x0,395 mm e 0,415x0,415 mm. Quanto ao raio de curvatura, segundo Yoshida et. al. ^[51, 52], fios retangulares necessitam apresentar valores inferiores a 1,0 mm para serem classificados como adequados. Observando-se a Tabela 1 percebe-se que todos os fios apresentam raios de curvatura inferiores a 0,8 mm, o que atende os requisitos necessários.

5.3 - Medidas de Microdurezas

Nas Tabelas 8 e 9 são apresentados os valores de dureza Vickers (HV) obtidos para os fios produzidos e importados, respectivamente. No caso dos fios produzidos estão apresentadas as microdurezas dos fios na condição de como-recebidos e laminados.

Tabela 8: Valores de dureza Vickers para os fios produzidos neste trabalho.

Dureza Vickers (HV)	Como recebido	Laminado
0,016x0,016	536 ± 7	603 ± 5
0,016x0,022	444 ± 7	479 ± 6
0,017x0,025	475 ± 6	518 ± 6
0,018x0,025	480 ± 5	559 ± 5
0,019x0,025	512 ± 7	575 ± 5
0,021x0,025	481 ± 8	565 ± 8

Tabela 9: Valores de dureza vickers para os fios importados.

Dureza Vickers	Como recebido
0,016x0,016	498 ± 22
0,016x0,022	548 ± 6
0,017x0,025	546 ± 7
0,018x0,025	547 ± 5
0,019x0,025	526 ± 4
0,021x0,025	561 ± 4

No caso da dureza medida nos fios na condição de laminado foi obtido um aumento médio de 12,6% em relação a condição de como recebido. Este aumento foi provavelmente causado pela deformação imposta durante o processo de laminação, já que este aço além de encruamento pode sofrer transformação de fase induzida por deformação.

Com exceção do fio 0,016x0,022 todos fios produzidos apresentaram uma dureza próxima ou superior as dos fios importados, conforme pode ser observado no gráfico Dureza X Condição do fio na Figura 31, onde são apresentadas as mudanças nas durezas dos fios depois do processo de laminação.

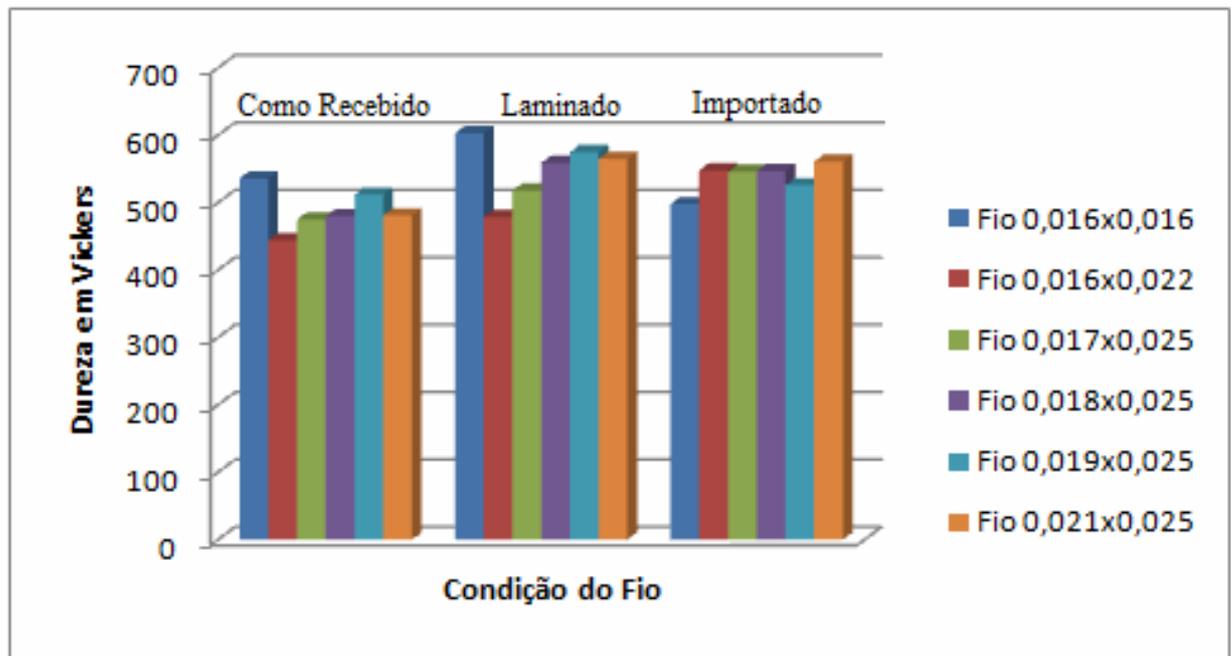


Figura 31: Gráfico da Dureza X Estado do fio.

5.4 - Ensaio de Tração e Flexão

Nas Figuras de 32 a 55 são apresentados os gráficos dos ensaios de tração e flexão dos fios na condição de laminado e importado. Para cada dimensão dos fios foram obtidos os seguintes gráficos; Tensão x Deformação e Força de ativação x Deformação para uma deformação de até 3 mm. Os gráficos dos ensaios de tração e flexão dos fios no estado como-recebido se encontram no apêndice A.

Os fios produzidos neste trabalho apresentaram uma excelente homogeneidade mecânica, como pode ser observado nas curvas obtidas nos ensaios de tração e flexão. Esses resultados mostram o bom desempenho do laminador construído. O mesmo não foi observado nos fios importados, já estes apresentaram heterogeneidade nos ensaios de tração e flexão.

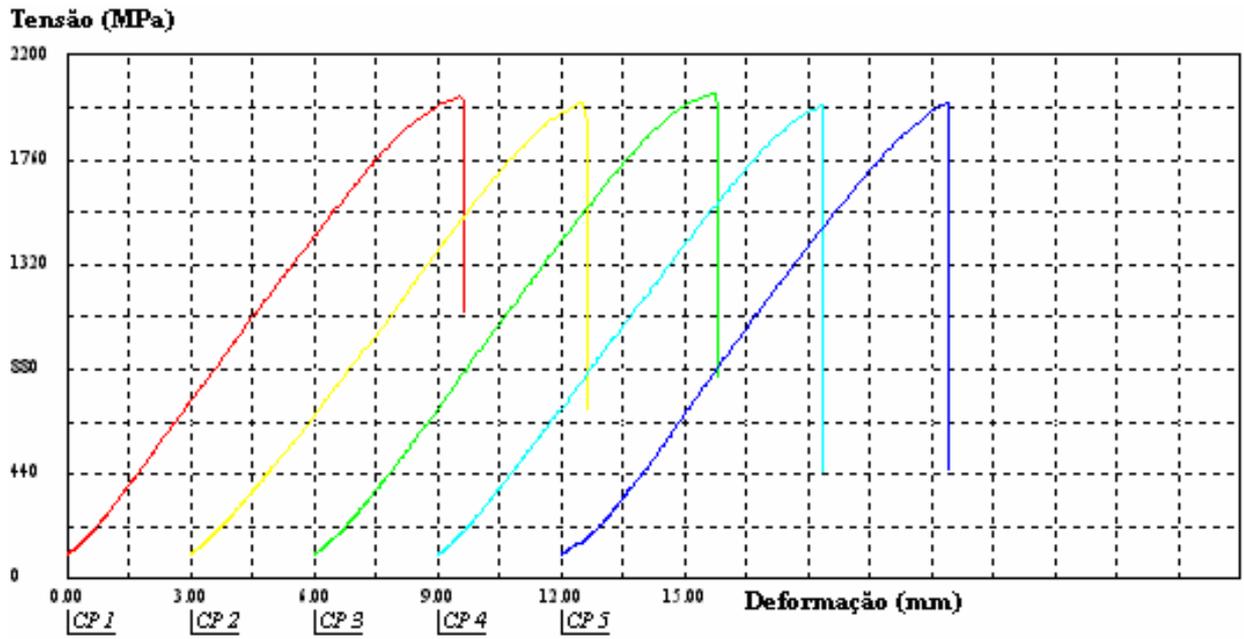


Figura 32: Gráfico da Tensão X Deformação do fio 16x16 laminado.

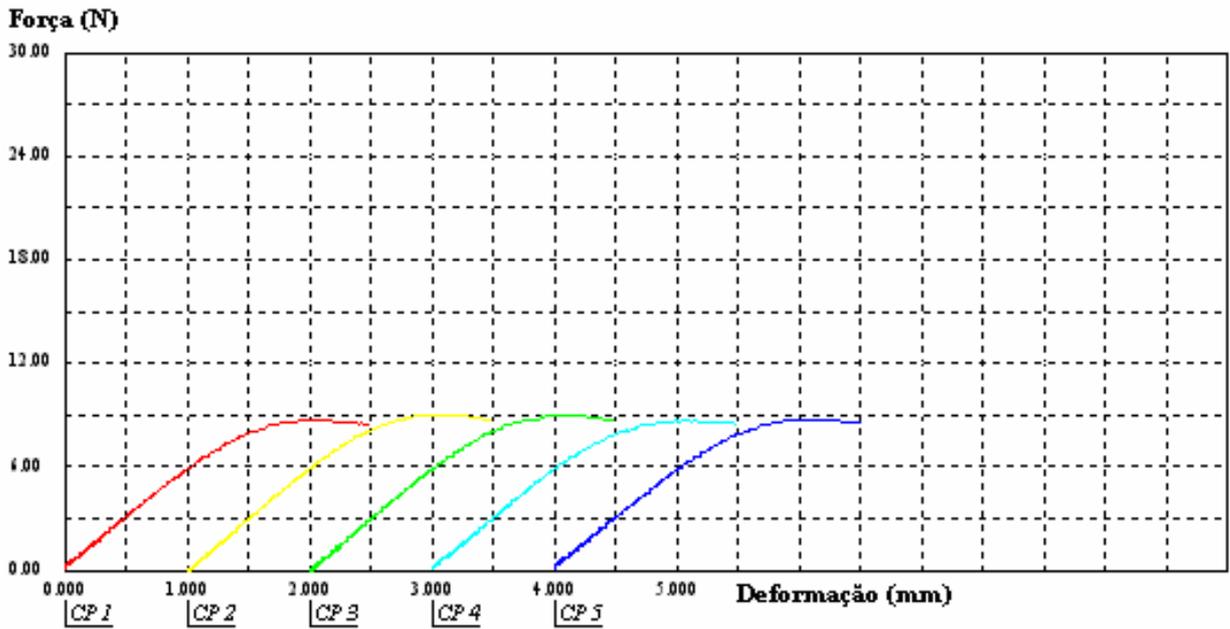


Figura 33: Gráfico da Força X Deformação do fio 16x16 laminado.

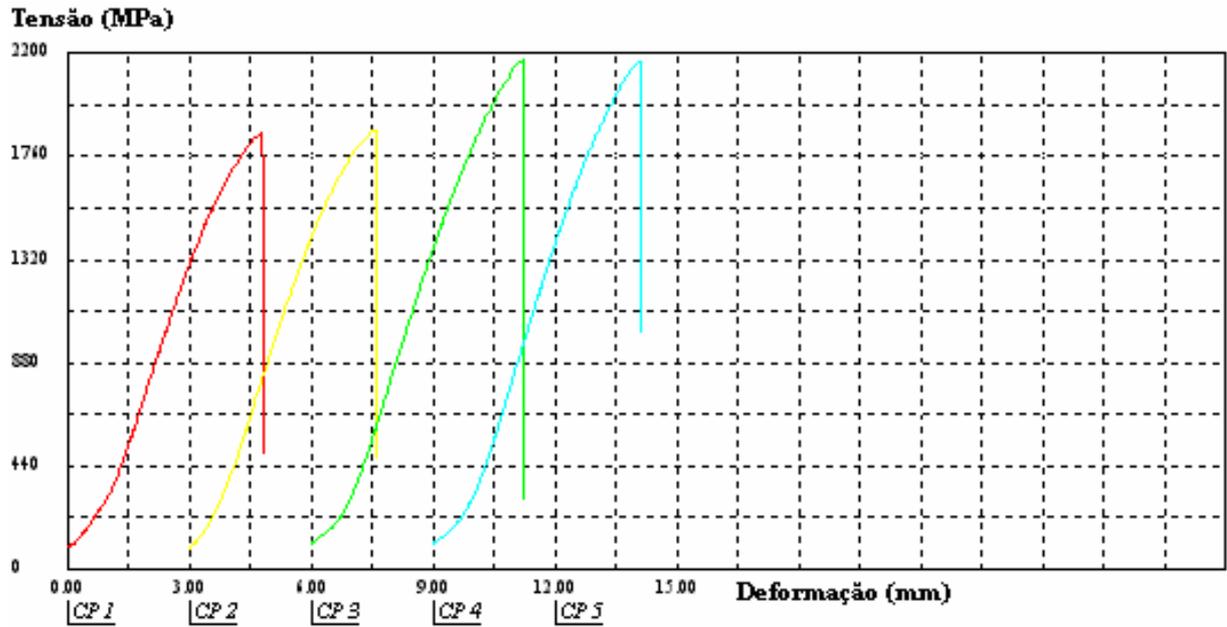


Figura 34: Gráfico da Tensão X Deformação do fio 16x16 importado.

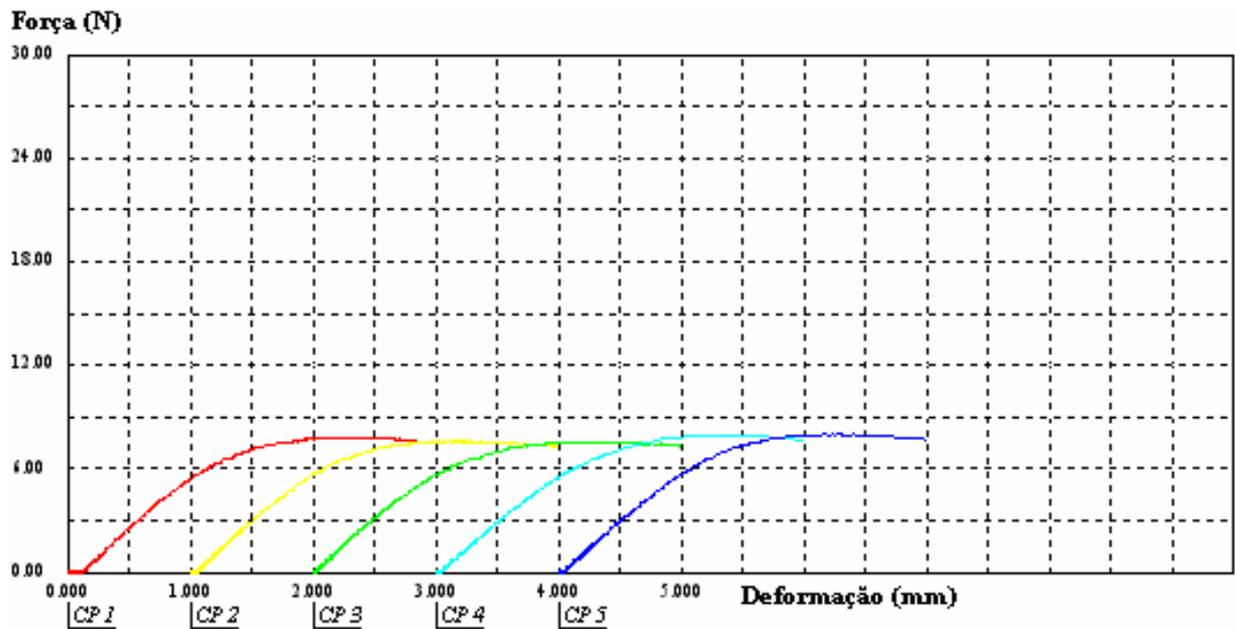


Figura 35: Gráfico da Força X Deformação do fio 16x16 importado.

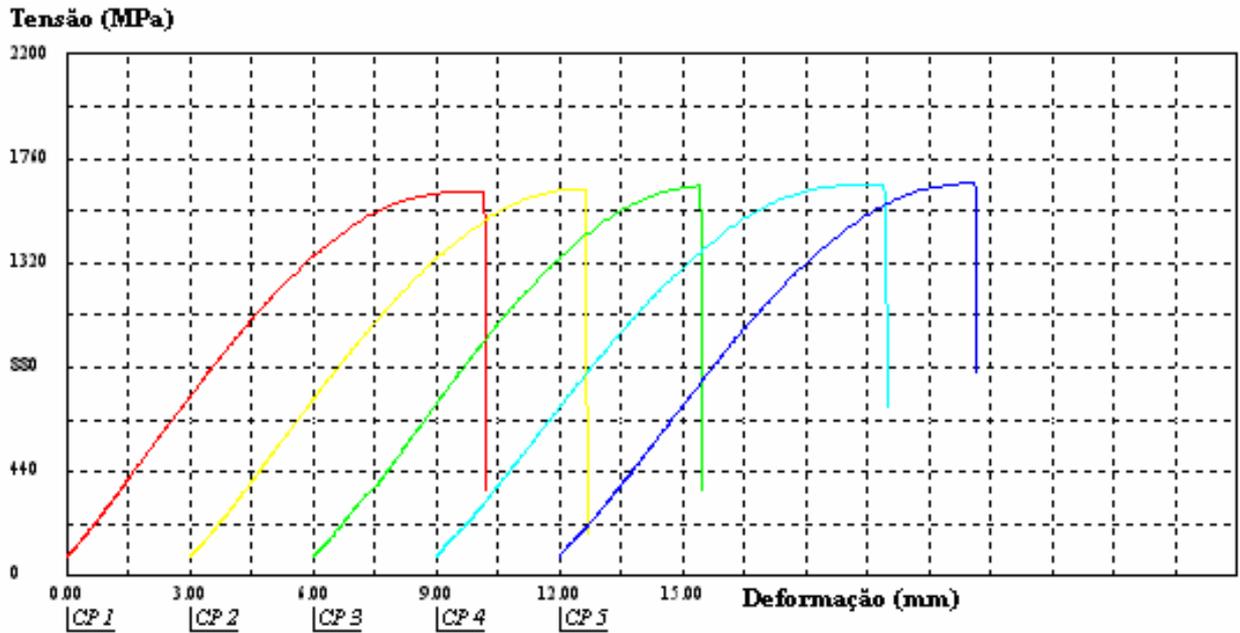


Figura 36: Gráfico da Tensão X Deformação do fio 16x22 laminado.

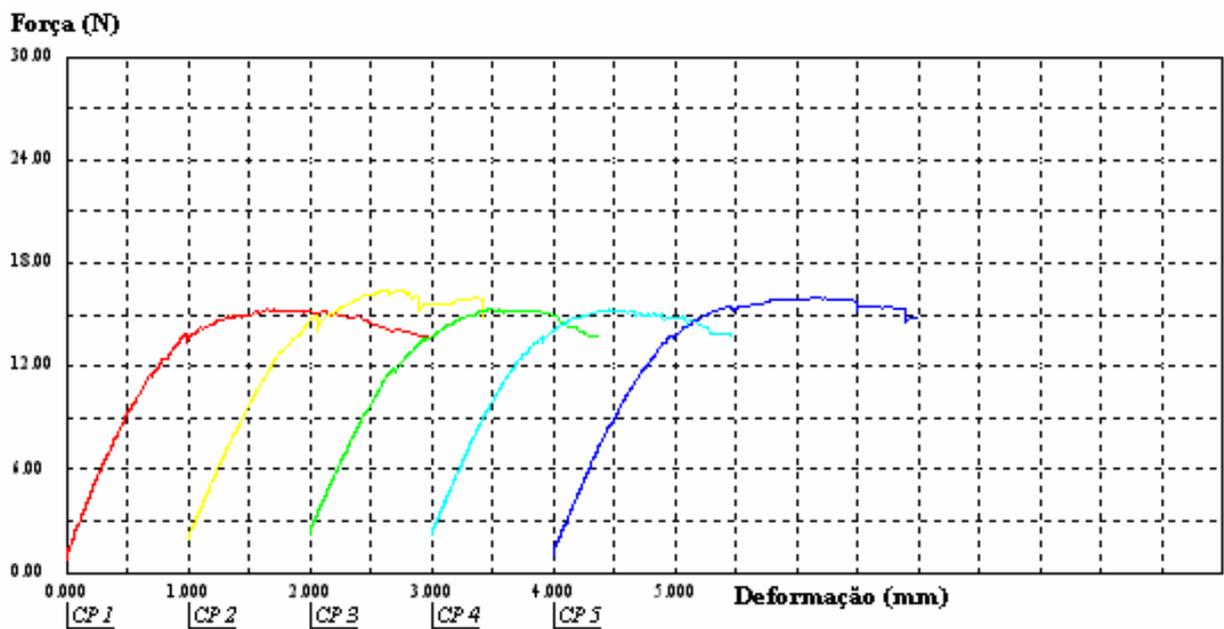


Figura 37: Gráfico da Força X Deformação do fio 16x22 laminado.

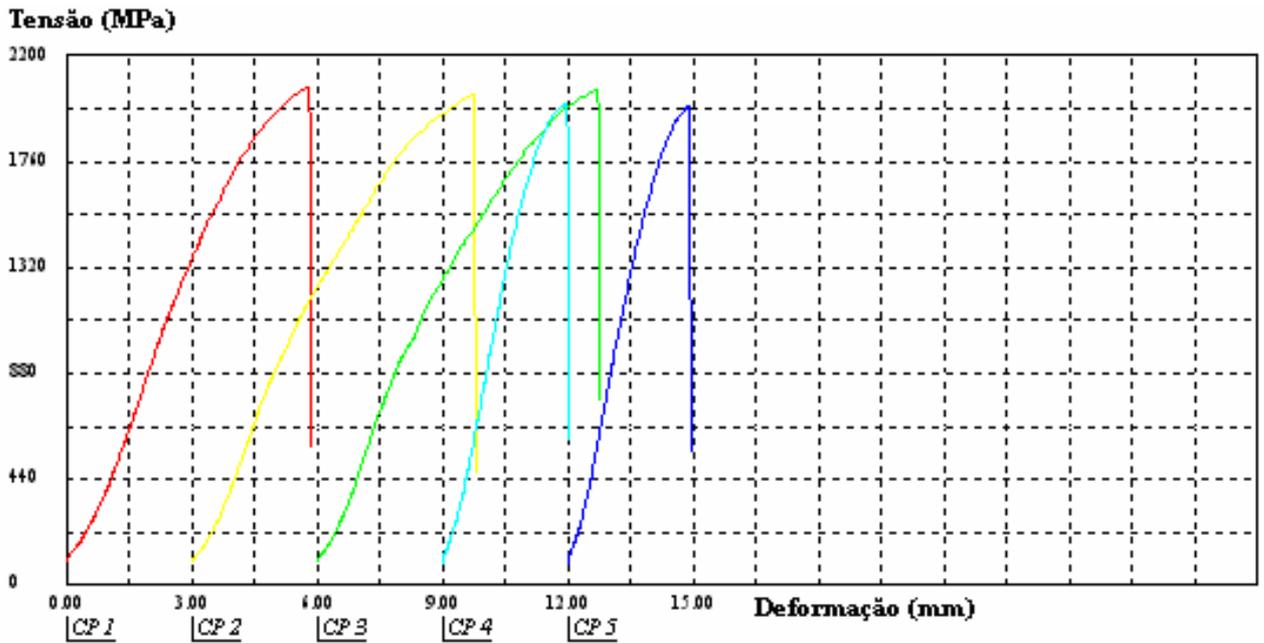


Figura 38: Gráfico da Tensão X Deformação do fio 16x22 importado.

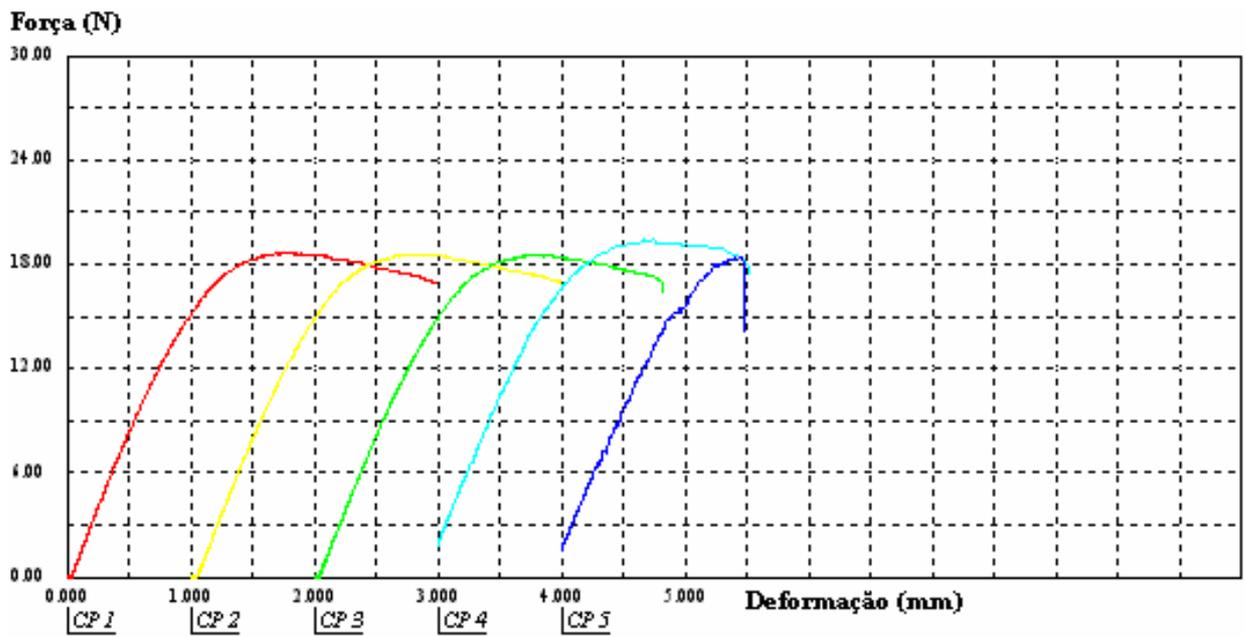


Figura 39: Gráfico da Força X Deformação do fio 16x22 importado.

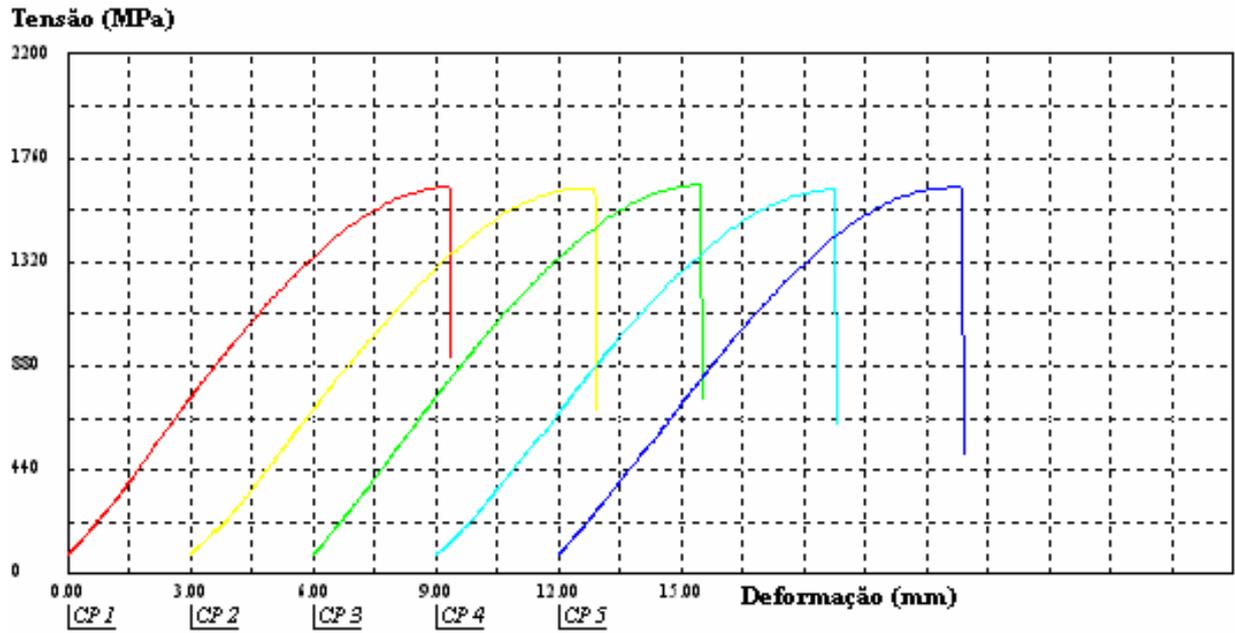


Figura 40: Gráfico da Tensão X Deformação do fio 17x25 laminado.

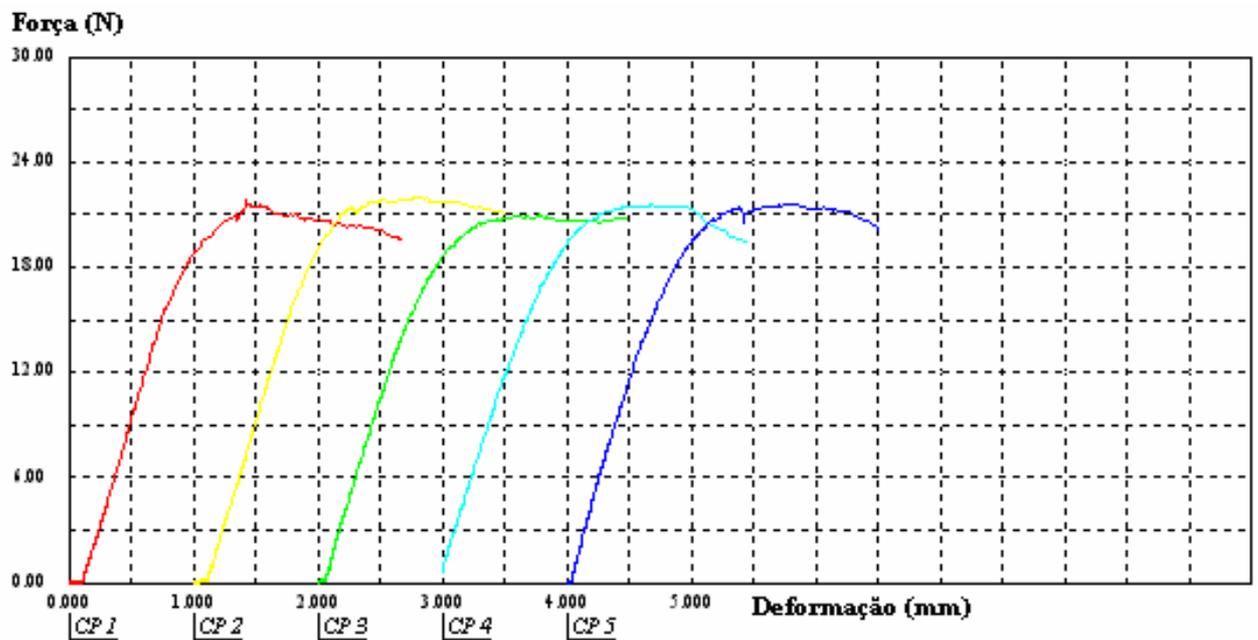


Figura 41: Gráfico da Força X Deformação do fio 17x25 laminado.

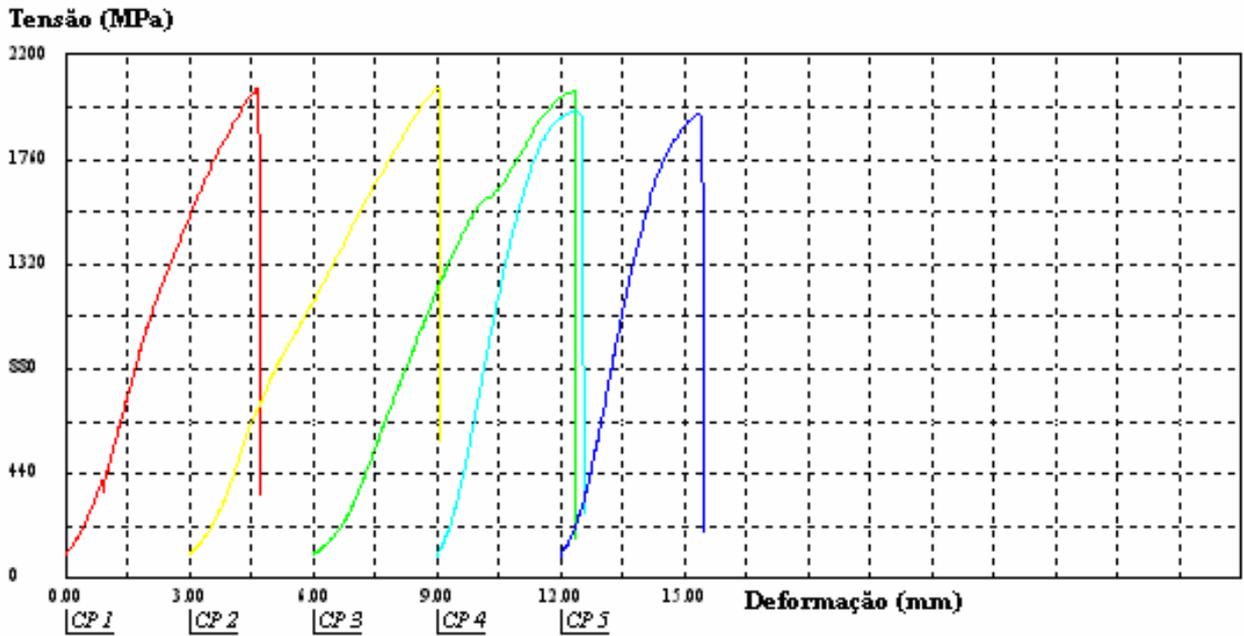


Figura 42: Gráfico da Tensão X Deformação do fio 17x25 importado.

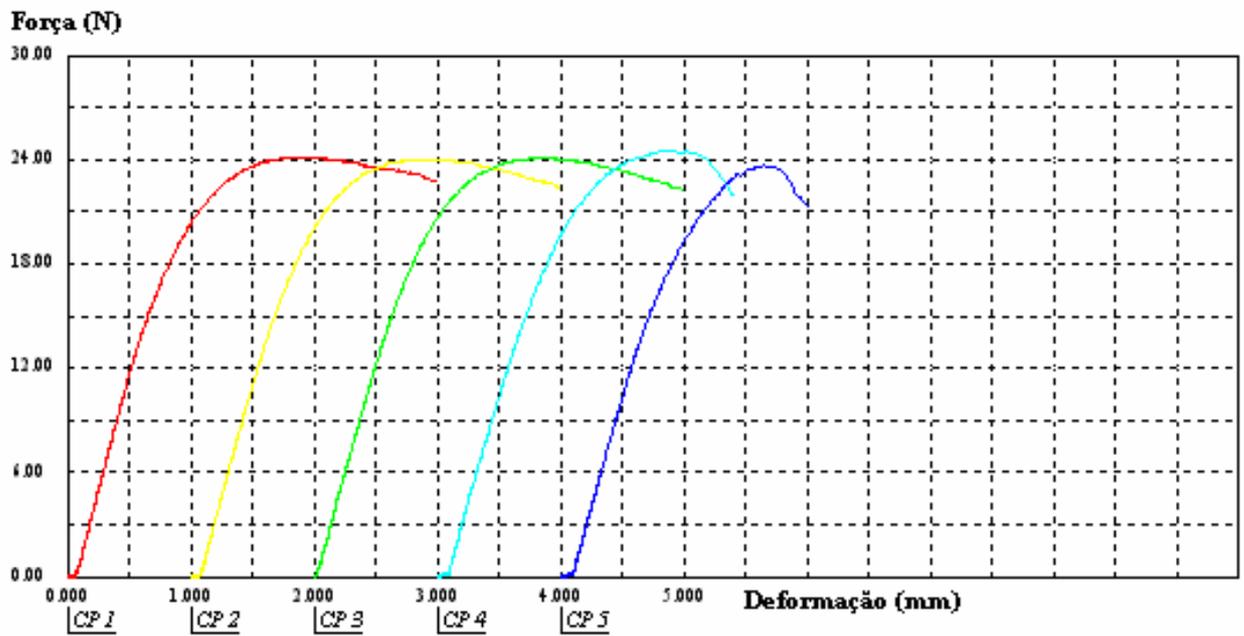


Figura 43: Gráfico da Força X Deformação do fio 17x25 importado.

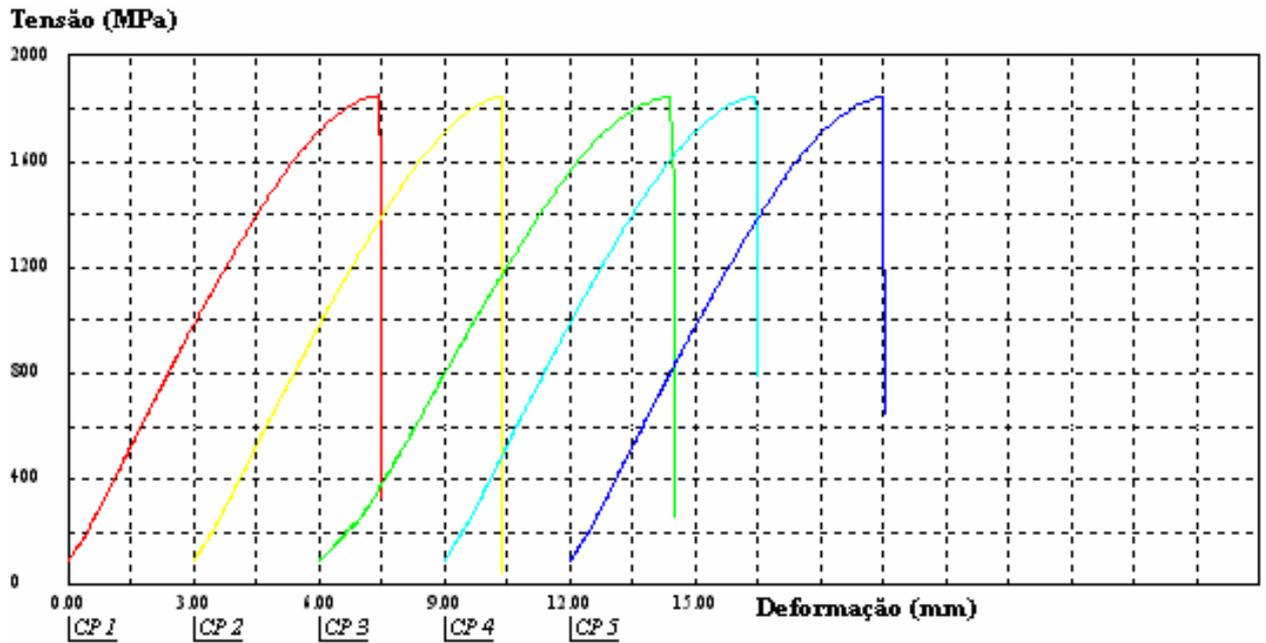


Figura 44: Gráfico da Tensão X Deformação do fio 18x25 laminado.

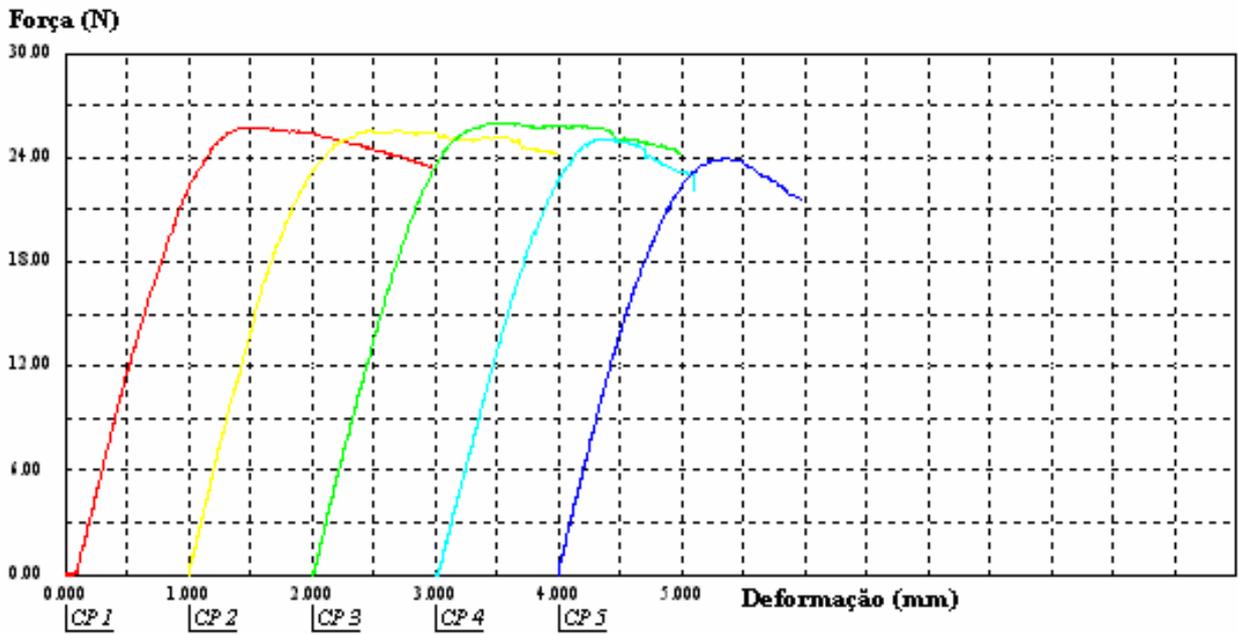


Figura 45: Gráfico da Força X Deformação do fio 18x25 laminado.

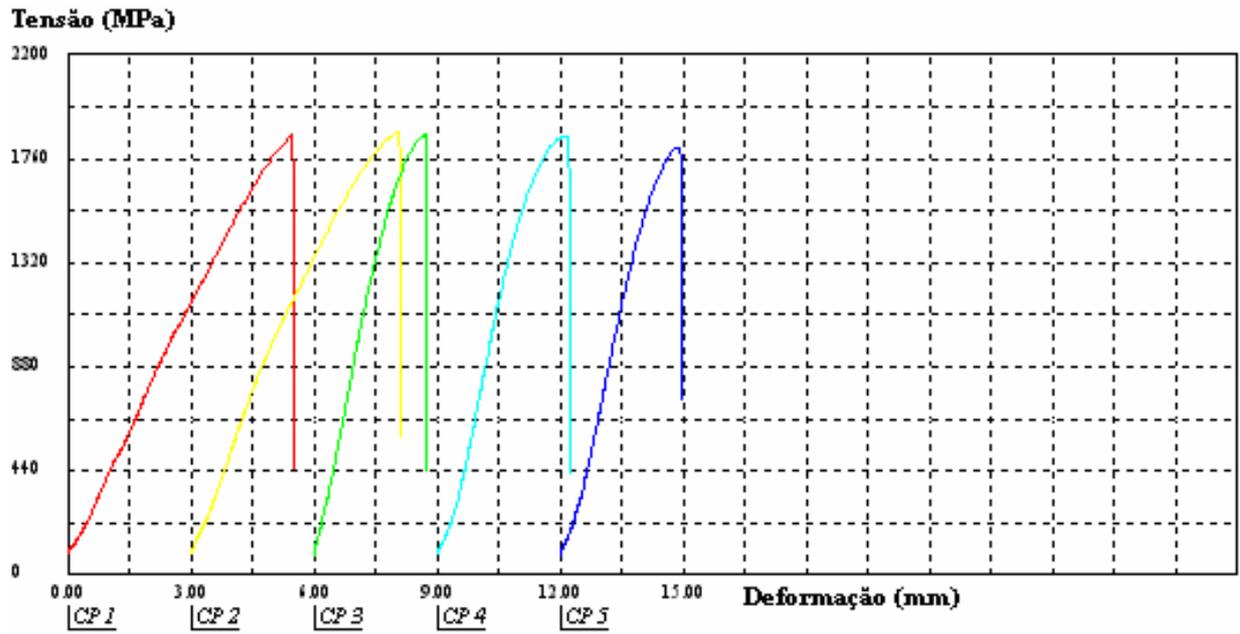


Figura 46: Gráfico da Tensão X Deformação do fio 18x25 importado.

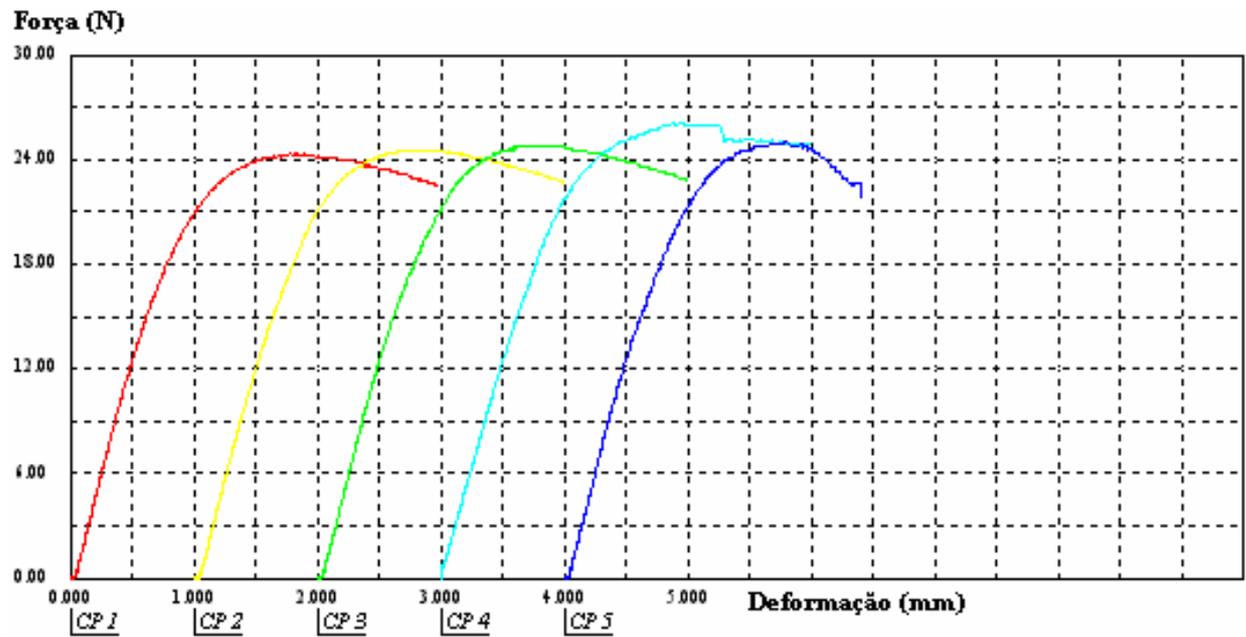


Figura 47: Gráfico da Força X Deformação do fio 18x25 importado.

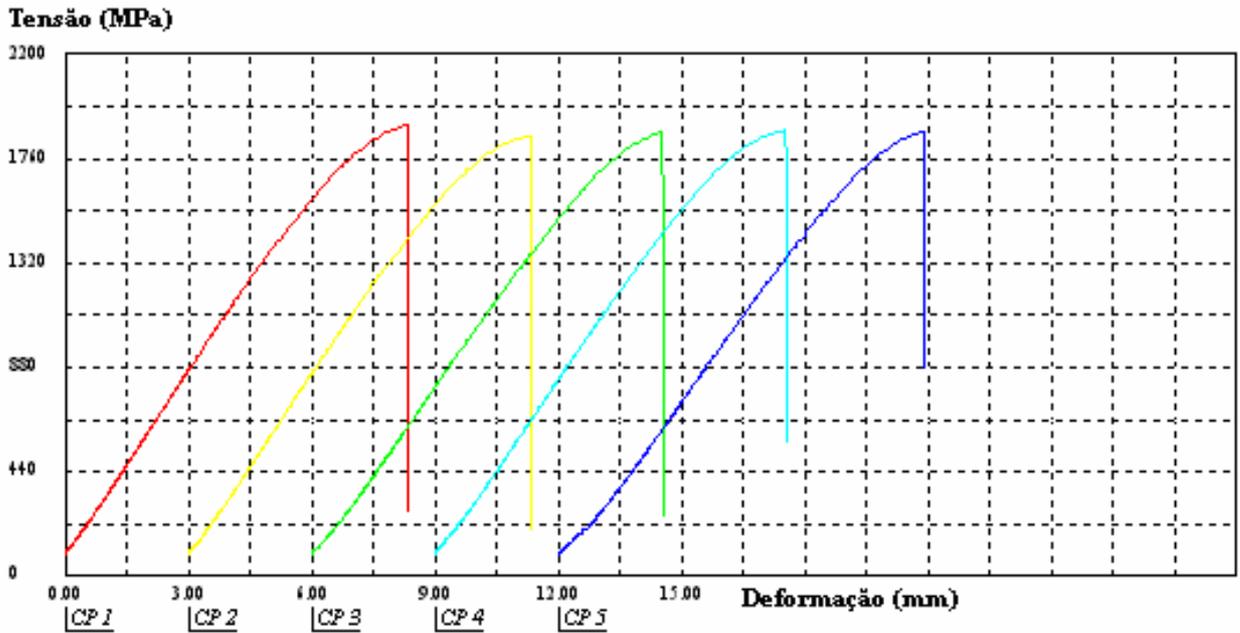


Figura 48: Gráfico da Tensão X Deformação do fio 19x25 laminado.

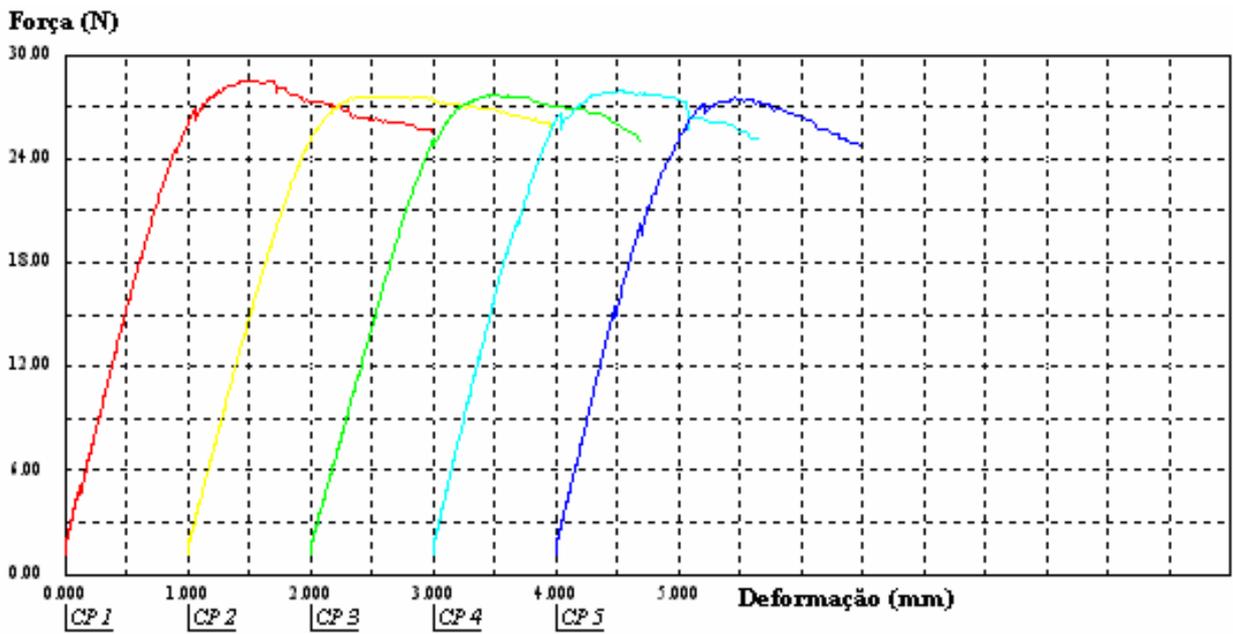


Figura 49: Gráfico da Força X Deformação do fio 19x25 laminado.

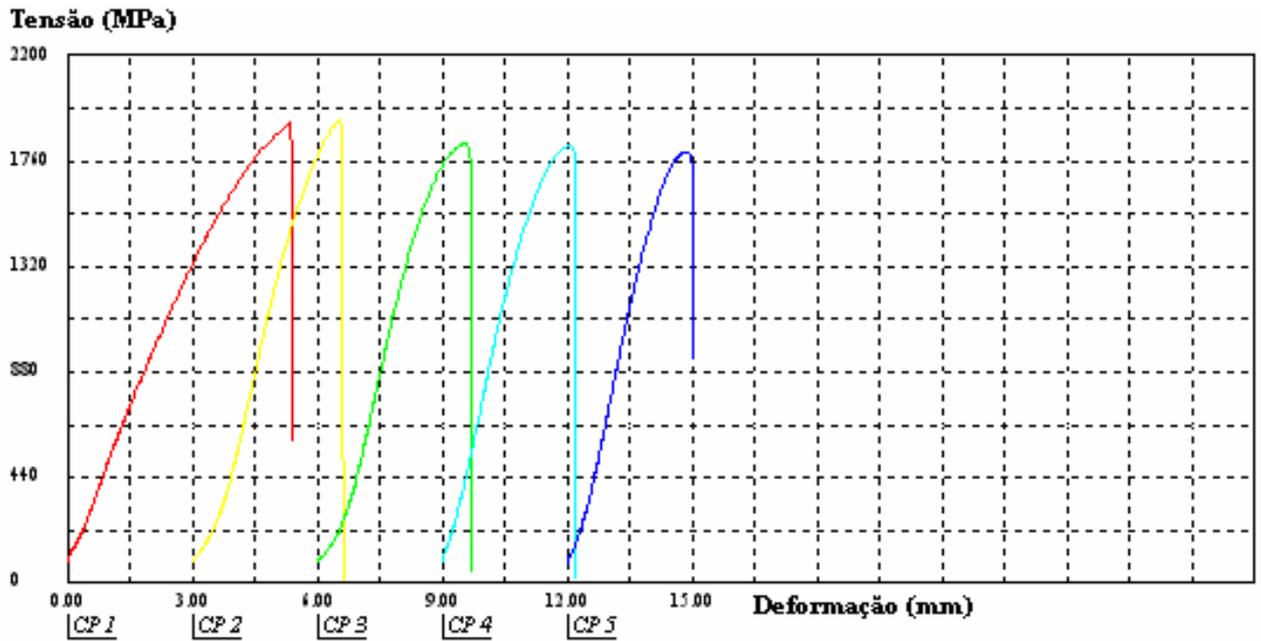


Figura 50: Gráfico da Tensão X Deformação do fio 19x25 importado.

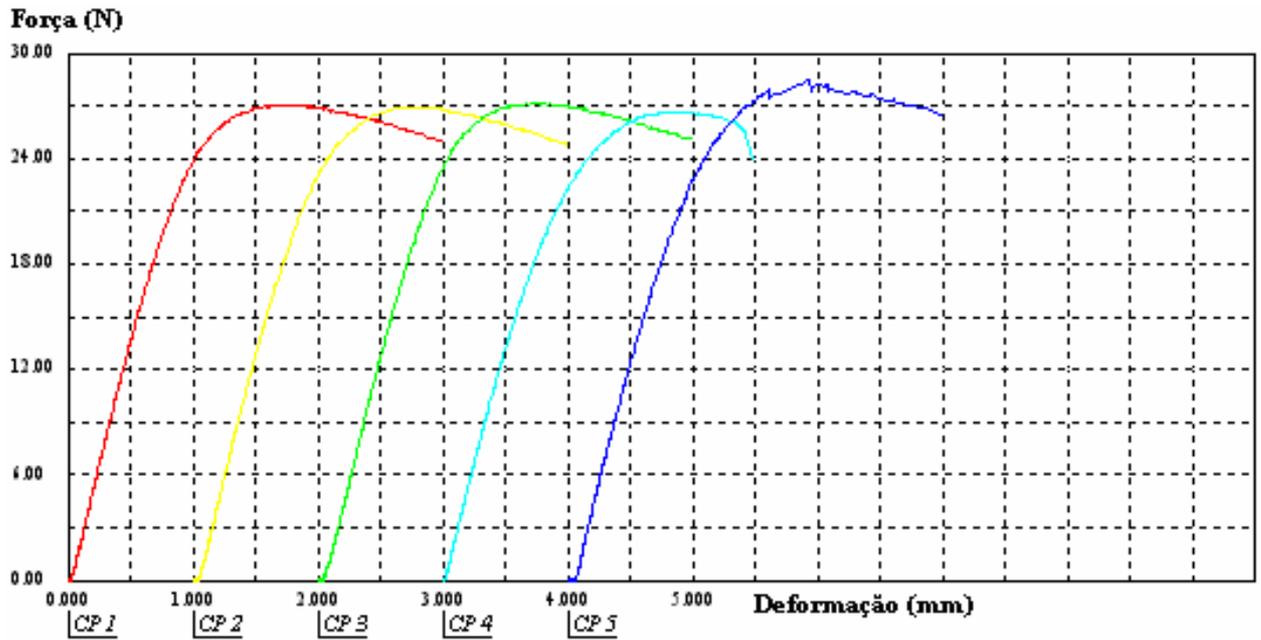


Figura 51: Gráfico da Força X Deformação do fio 19x25 importado.

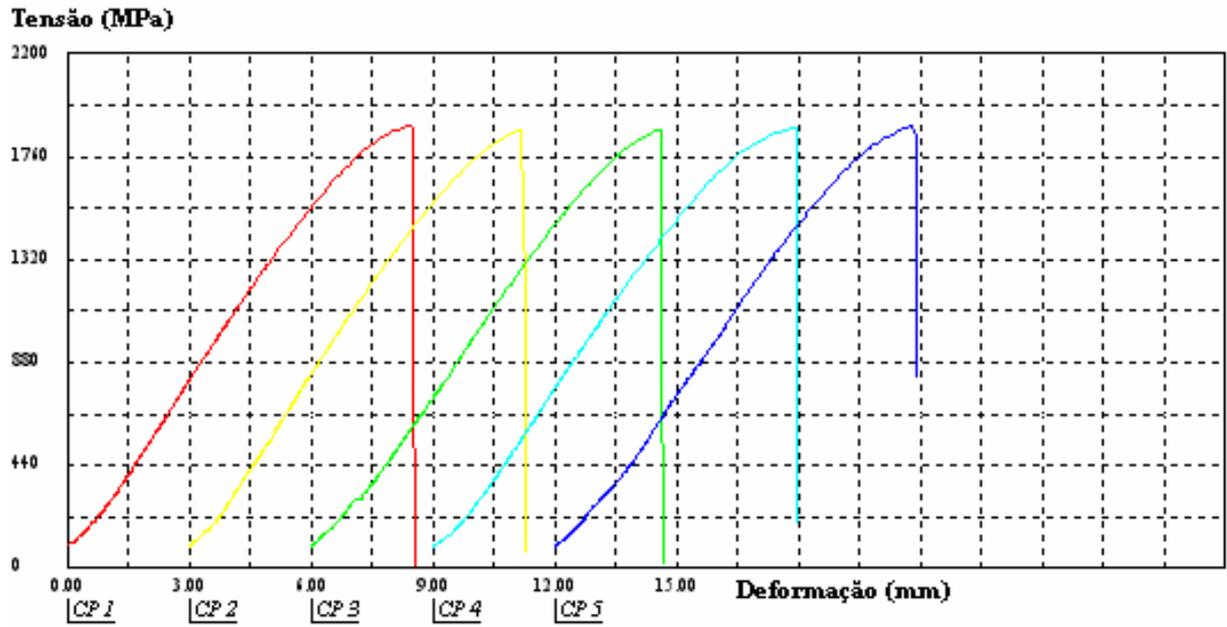


Figura 52: Gráfico da Tensão X Deformação do fio 21x25 laminado.

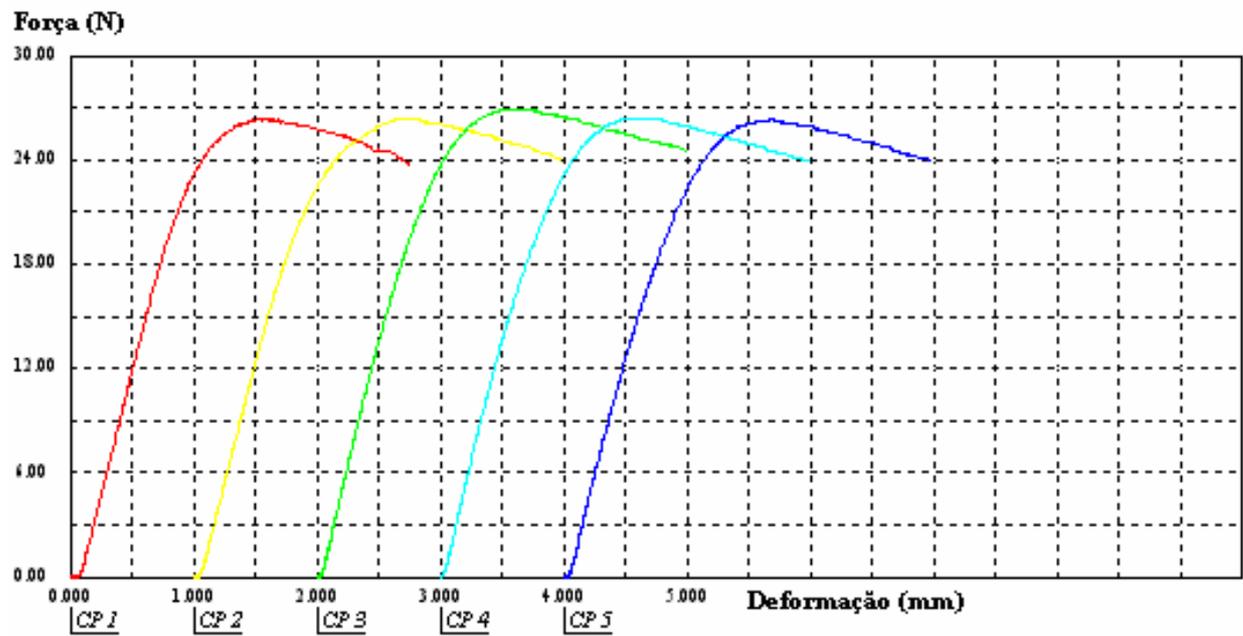


Figura 53: Gráfico da Força X Deformação do fio 21x25 laminado.

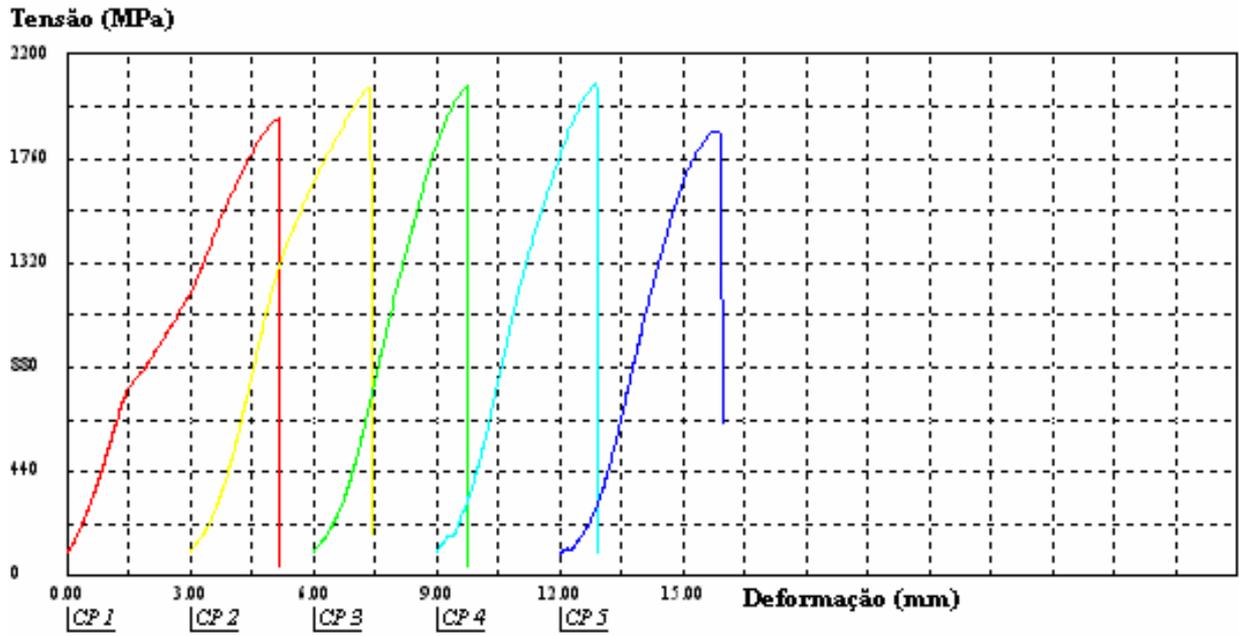


Figura 54: Gráfico da Tensão X Deformação do fio 21x25 importado.

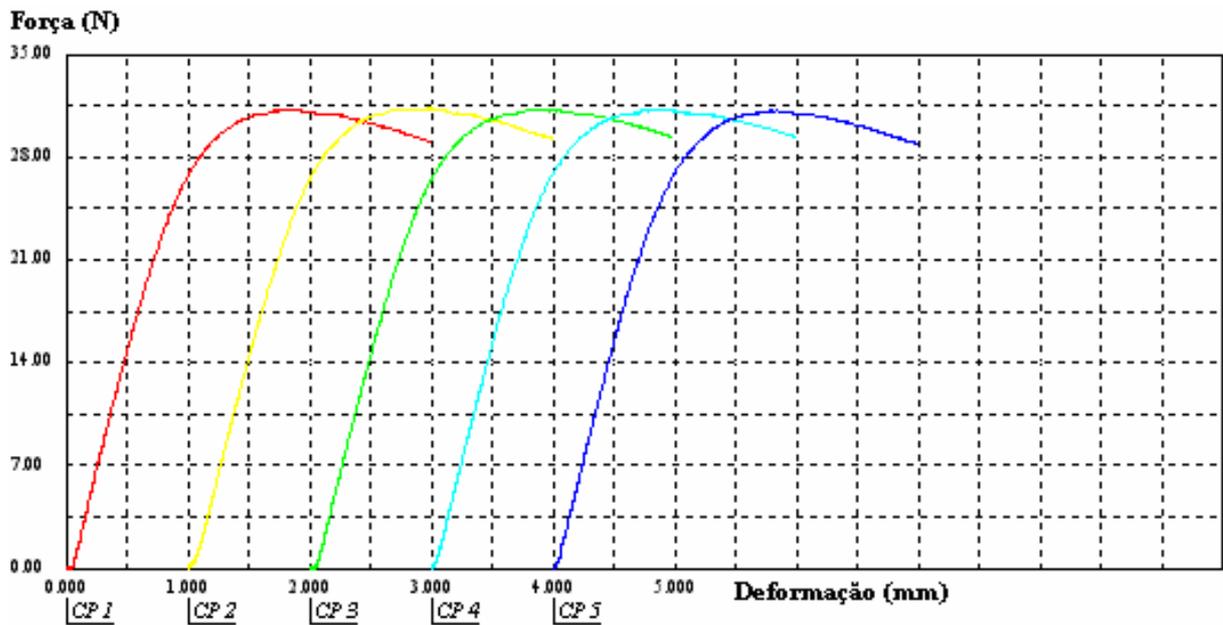


Figura 55: Gráfico da Força X Deformação do fio 21x25 importado.

Nas Tabelas de 10 a 12 são apresentados os valores de força de ativação, resistência à flexão e resistência a tração obtidos para os fios como recebidos, laminados e importados respectivamente.

Tabela 10: Propriedades mecânicas dos fios como recebidos.

Fio (mm)	Força de ativação (N)	Resistência à flexão (MPa)	Resistência à tração (MPa)
0,45	7,9 ± 0,1	1315 ± 9	2011 ± 12
0,53	10,9 ± 0,1	1120 ± 14	1558 ± 13
0,59	16,3 ± 0,2	1212 ± 12	1719 ± 8
0,61	18,3 ± 0,1	1231 ± 9	1751 ± 5
0,62	20,2 ± 0,1	1296 ± 6	1833 ± 12
0,65	21,9 ± 0,1	1219 ± 4	1790 ± 13

Tabela 11: Propriedades mecânicas dos fios laminados.

Fio (mm)	Força de ativação (N)	Resistência à flexão (MPa)	Resistência à tração (MPa)
0,016x0,016	8,9 ± 0,2	1189 ± 20	2030 ± 21
0,016x0,022	15,7 ± 0,5	1112 ± 37	1787 ± 15
0,017x0,025	21,6 ± 0,4	1118 ± 19	1779 ± 6
0,018x0,025	25,3 ± 0,8	1238 ± 39	1847 ± 13
0,019x0,025	27,9 ± 0,4	1305 ± 18	1878 ± 16
0,021x0,025	26,5 ± 0,3	1109 ± 11	1884 ± 10

Tabela 12: Propriedades Mecânicas dos fios retangulares importados.

Fio importado (mm)	Força de ativação (N)	Resistência à flexão (MPa)	Resistência à tração (MPa)
0,016x0,016	7,8 ± 0,2	1046 ± 26	1932 ± 168
0,016x0,022	18,7 ± 0,4	1326 ± 28	2032 ± 36
0,017x0,025	24,1 ± 0,3	1247 ± 14	2001 ± 45
0,018x0,025	24,8 ± 0,7	1223 ± 35	1849 ± 24
0,019x0,025	27,3 ± 0,7	1264 ± 32	1864 ± 62
0,021x0,025	31,2 ± 0,1	1306 ± 13	2001 ± 93

O termo força de ativação é utilizado por ortodontistas para fazer referência a força que fio exerce durante o regime elástico para uma deformação de até 3 mm. Esta força é uma medida da força exercida pelo fio para voltar a posição inicial ^[1-6, 16-18].

A força de ativação foi obtida em Newton e seu cálculo não leva em consideração a área do fio e sua forma da secção transversal do mesmo. Portanto neste caso não se pode estabelecer uma comparação entre as forças obtidas para o fio como recebido e o fio laminado, já que estes possuem secção transversal redonda e retangular respectivamente.

A Figura 56 mostra um gráfico que estabelece uma comparação entre as forças de ativação obtidas para os fios laminados e importados. Verifica-se que a força de ativação medida nos fios laminados e nos fios importados, é bastante semelhante para três dos fios, sendo eles o 0,016x0,016, 0,018x0,025 e 0,019x0,025. No caso dos fios 0,016x0,022, 0,017x0,025 e 0,021x0,025, a força de ativação medida nos fios importados foi em média 16% superior a que foi obtida nos fios laminados. Este resultado mostra que o encruamento imposto pela deformação plástica não foi suficiente para que os fios laminados apresentassem força de ativação semelhante a dos importados.

A deformação está relacionada com a área da secção transversal de entrada e a área da secção transversal de saída, e como a área secção transversal de entrada não pode ser alterada,

a deformação imposta pelo laminador vai ser sempre a mesma para uma determinada dimensão de fio. Trabalhar com um fio mais grosso, ou seja, com a área da secção transversal de entrada maior, não é uma opção, pois o excesso de massa se desloca formando os cantos do fio e se área da secção transversal de entrada foi maior que área da secção transversal de saída, a massa entrar entre os cilindros do laminador, conforme pode ser visto nas figuras 20, 22 e 23. Portanto para que os fios 0,016x0,022, 0,017x0,025 e 0,021x0,025, apresentem força de ativação superior à obtida anteriormente, necessita-se trabalhar com fios no estado como-recebido com força de ativação superior as dos fios usados neste trabalho. Para isso seria necessário trabalhar com fios no estado de como recebido com maior resistência à tração.

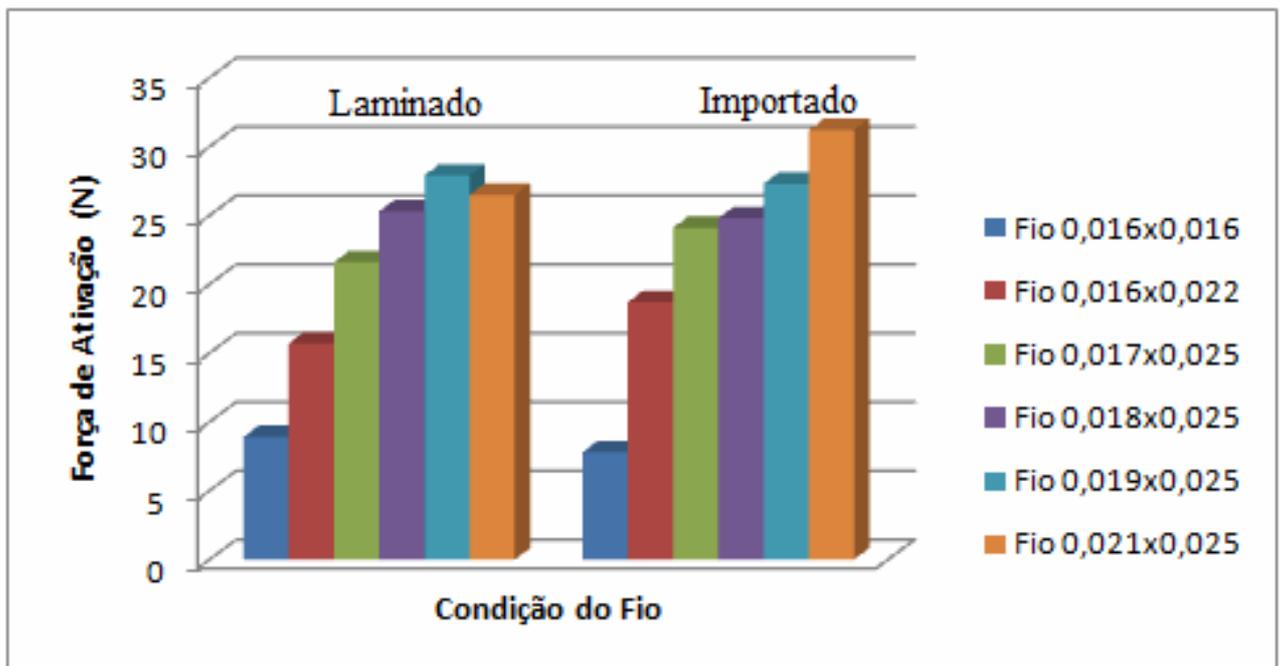


Figura 56: Gráfico da Força de ativação X Estado do fio.

A força de ativação medida neste trabalho é um resultado utilizado no cálculo da resistência à flexão. Esta por sua vez leva em consideração a forma da secção transversal do fio, portanto mais uma vez não se pode estabelecer comparação entre a resistência à flexão obtidas para os fios no estado como-recebido e laminado, já que nesse caso tanto a forma da

secção transversal como a posição do fio durante o ensaios vão estar diretamente relacionados com a resistência à flexão, conforme pode ser visto na Figura 57.

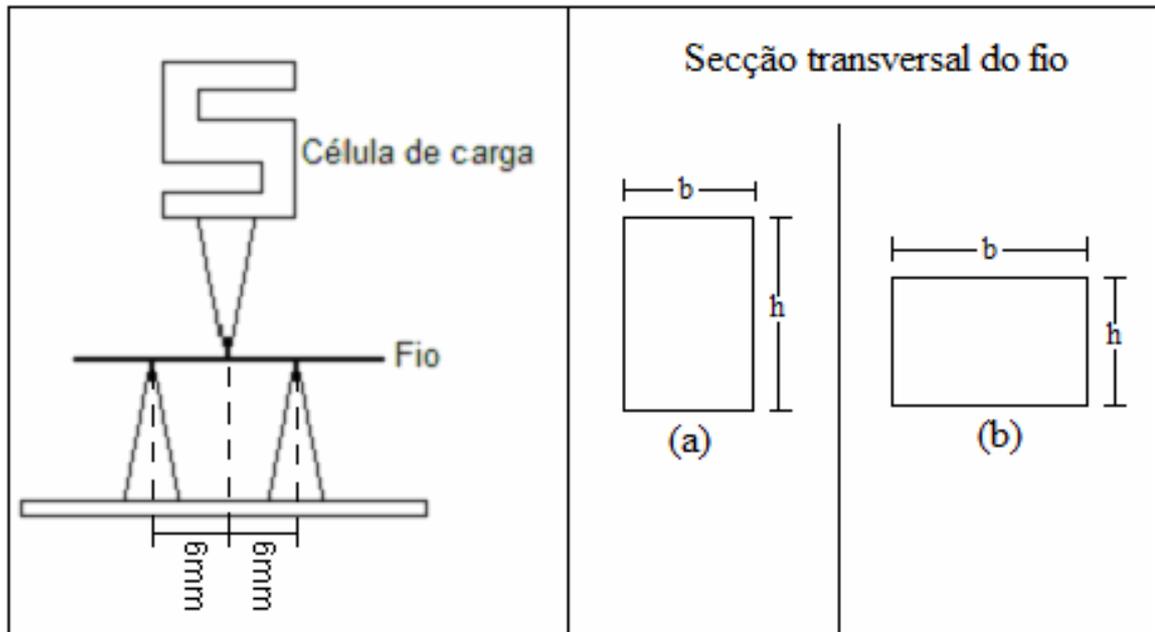


Figura 57: Esquema da montagem do dispositivo para os ensaios de flexão, mostrando as possíveis posições dos fios durante o ensaio.

A resistência a flexão foi obtida em MPa e foi calculada de acordo com as equações presentes no tópico 3.3.2. A posição do fio durante o ensaio é aquela mostrada na Figura 57(a).

A Figura 58 mostra um gráfico da resistência Flexão X Estado do fio, neste gráfico esta presente uma comparação entre os fios laminados e importados. Os fios 0,016x0,016, 0,018x0,025 e 0,019x0,025 apresentaram resistência a semelhante aos fios importados, já nos fios 0,016x0,022, 0,017x0,025 e 0,021x0,025 o valor medido foi inferior. Este resultado já era previsto, pois estes mesmos fios já haviam apresentado força de ativação inferior aos fios importados. Como a força de ativação é proporcional a resistência à flexão, trabalhar com fios no estado de como recebido com força de ativação superior a dos fios trabalhados

anteriormente, provavelmente vai fazer com a força de ativação medida nos fios após laminados seja superior e conseqüentemente a resistência à flexão também.

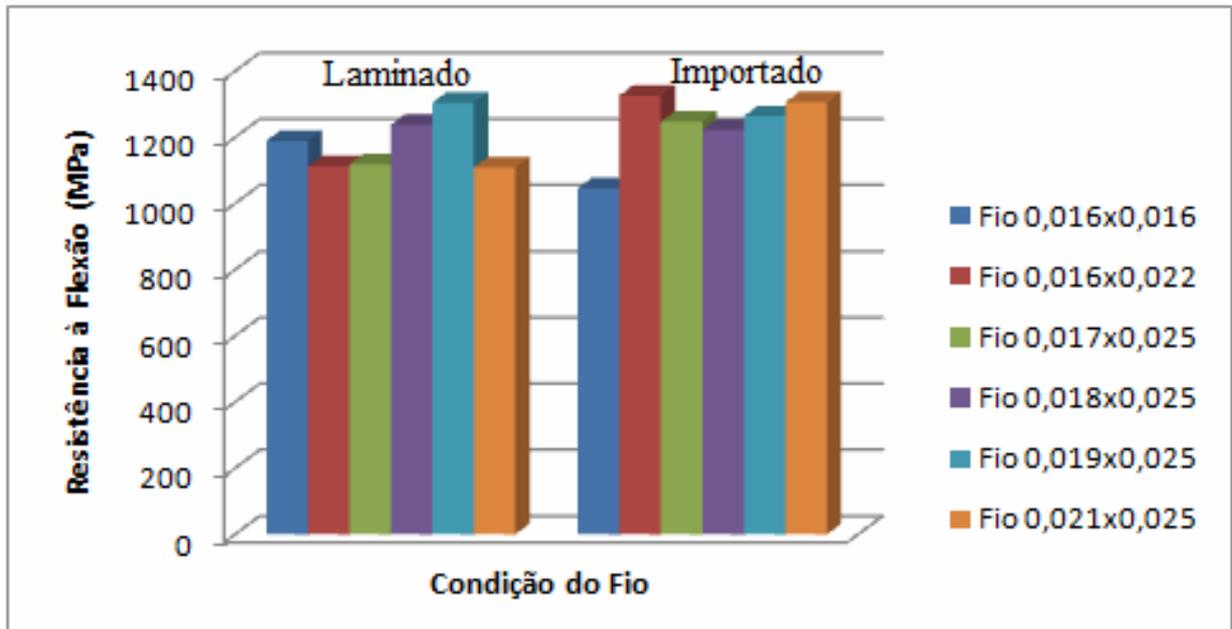


Figura 58: Gráfico da Resistência a Flexão X Estado do fio.

Com relação à resistência à tração, os fios laminados apresentaram um aumento médio de 5,4% em relação ao estado de como recebido. Esse aumento fez com que todos fios apresentassem resistência à tração próxima ou superior a 1700 MPa, como pode ser observado na Figura 59, a qual mostra um gráfico comparativo das resistências à tração dos fios como recebido, laminados e importados.

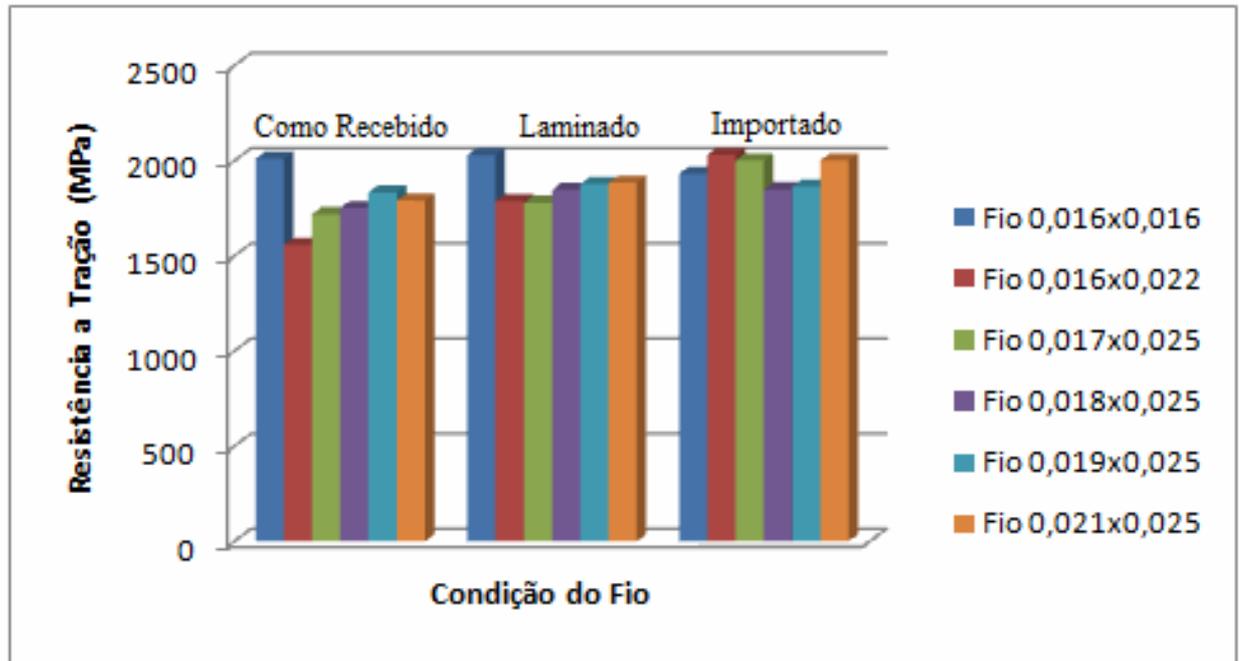


Figura 59: Gráfico da Resistência à Tração X Estado do fio.

Este resultado segundo alguns autores ^[1, 2] está dentro do que os ortodontistas exigem, pois para que os fios possam ser utilizados na correção ortodôntica precisam ter resistência à tração superior a 1600 MPa.

Comparando agora os fios laminados com fios importados (Figura 59), percebe-se que os valores medidos de resistência à tração estão bem próximos, exceto para o caso dos fios 0,016x0,022 e 0,017x0,025, os quais apresentaram valores inferiores aos dos importados, mas ainda assim acima de 1600 MPa.

6 - Conclusões

Os resultados apresentados neste trabalho mostram que foi possível desenvolver e construir um laminador ajustável para fios ortodônticos retangulares. Verifica-se não só que o laminador construído foi capaz de produzir fios ortodônticos de boa qualidade, mas também a facilidade de produção de varias dimensões de fios usando o mesmo laminador, já que no processo tradicional de trefilação é necessário o uso de matrizes de alto custo e específicas para cada dimensão de fio.

Obteve-se, com o uso do laminador construído, fios com as secções retangulares desejadas, dentro das especificações da norma. As variações dimensionais apresentadas, tanto das arestas dos fios quanto dos raios de curvatura estão dentro das estipuladas.

Os fios produzidos no laminador desenvolvido apresentaram homogeneidades mecânicas superiores as dos fios importados.

Quanto as propriedades mecânicas todos os fios produzidos apresentaram excelentes resultados, no que diz respeito a dureza, força de ativação, resistência à flexão e resistência à tração. Apenas alguns deles apresentaram valores levemente inferiores aos dos importados, porém sempre acima dos valores exigido pelos ortodontistas, o que indica o grande potencial dos mesmos para aplicações ortodônticas.

Referências

1. SMIT, D. C.; PILLIAR, R. M.; CHERNECKI, R., Dental implant materials: some effects of preparative procedures on surface topography. *Journal of Biomedical Materials Research*, v.25, p.1045-1068, 1991.
2. COTRIM-FERREIRA, F. A., Biomecânica do movimento dental. In: VELLINI-FERREIRA, F., *Ortodontia: diagnóstico e planejamento clínico*. São Paulo: Artes Médicas, 1996, p.353-390.
3. MACHADO, R. G. et. al., Evaluation of orthodontic brackets corrosion: Revista virtual de odontologia. *Virtual Odontol*, v. 4, n.1, p.15-27, 2007.
4. GURGEL, J. A.; RAMOS, A. L.; KERR, S. D., Orthodontic Wires. *Revista Dental Press de Ortodontia e Ortopedia Facial*, v.6, n.4, p.103-114, Jul./Ago., 2001.
5. *THE HISTORY of orthodontics*. Designed in cooperation with The Shodor Education Inc. The University of North Carolina at Chapel Hill, Copyright 1999. Disponível em: <http://www.unc.edu/depts/appl_sci/ortho/>. Acesso em: 01 de Fevereiro de 2006.
6. DRAKE, S. R. et al., Mechanical properties of orthodontic wires in tension, bending, and torsion. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, v.1982, p.206-210, 1998.
7. CALLISTER, W. D. JR., *Science and Engineering of Materials: an introduction*. 5 ed., Rio de Janeiro: Editora LTC – Livros técnicos e Científicos S.A., 2002, cap. 12.
8. *ILUSTRAÇÃO de como é produzido o torque nos braquetes*. Disponível em: <www.scielo.br/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=Sc> Acesso em: 10 de Abril de 2007.
9. ACHARYA, K. A.; JAYADE, V. P., Metallurgical properties of stainless steel orthodontic archwires. *Trends in Biomaterials & Artificial Organs*, v.18, n.2, p.125-136, January, 2005.
10. NIKOLAI, R. J., Orthodontic wire: A continuing evolution. *Seminars in orthodontic*, v.3, n.3, p. 157-165, September., 1997.

11. HELMAN, H.; CETLIN, P. R., Fundamentos de conformação mecânicas dos metais. 2. ed., São Paulo: Artliber Editora Ltda, 1993, cap.1, 6 e 8.
12. NASTRAN, M.; KUZMAN, K., Stabilisation of mechanical properties of the wire by roller straightening. *Journal of Materials Processing Technology*, v.125/126, p.711–719, 2005.
13. POURLADIAN, B., Fracture toughness evaluation of a high-strength cold-drawn type 304 stainless steel wire. *Wire Journal International*, v.36, n.8 p.71-74, August, 2003.
14. SARBAN A.; PADDEU G.; PONTIEU, J., An automatic width control system for wire rolling mills. *Wire Journal International*, p.128-138, October, 2001.
15. BS 3507:1976 – Orthodontic wire and tape and dental ligature wire. Dental materials, *Sciences & Health Care*, Module 05, Setembro, 2007. Disponível em: <<http://products.ihs.com/bs-seo/00042234.htm>>. Acesso em: 20 de Janeiro de 2008.
16. THIESEN, G. et. al., A importância da incorporação do controle de torque no tratamento ortodôntico. *Rev. Clinica Dental Press*, Maringá, v.2, n.4, p.65-79, Ago./Set. 2003.
17. PARKHOUSE, R. C., Fio retangular e dobra de terceira ordem: Uma nova perspectiva. *Journal of Orthopedics-Orthodontics and Pediatric Dentistry*, v.3, n.3, p.28-38, 2001.
18. LANES, M. A. et al, A comparasion of forces systems in different lengths of springs for space closure in orthodontics. *Ortodontia Gaúcha*, v.8, n.2, p.11-17, Jul./Dez. 2004.
19. UTILIZAÇÃO de aços inoxidáveis. Disponível em: <<http://www.acesita.com.br>> Acesso em: 07 de Fevereiro de 2007.
20. VILLAMIL, R. F. V. et al, Aços inoxidáveis em implantes ortopédicos: fundamentos e resistência a corrosão. *Revista Brasileira*, v. 37, n.11/12, p.471-476, Nov./Dez., 2002.
21. SHIN, H. C.; HA, T. K.; CHANG, Y. W., Kinetics of deformation induced martensitic transformation in a 304 stainless steel. *Scripta Materialia*, v.45, p.823-829, 2001.

22. GHOSH, M.; CHATTERJEE, S., Characterization of transition joints of commercially pure titanium to 304 stainless steel. *Materials Characterization*, v.48, p.393-399, 2002.
23. SOUZA, J. F. P., Propriedades mecânicas de aços inoxidáveis austeníticos nitretados submetidos à hidrogenação catódica, 2006. Dissertação (Mestrado) – Setor de Ciências Exatas da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.
24. KUMAR, B. R. et al, Deformation-induced transformation textures em metastable austenitic stainless steel. *Materials Science and Engineering A*, v.429, p.205-211, 2006.
25. PADILHA, A. F.; GUEDES, L. C., *Aços inoxidáveis austeníticos: microestrutura e propriedades*. São Paulo: Editora Hemus, 1994.
26. SILVA, A. L. C.; MEI, P. R., *Aços e ligas especiais*. 2. ed., São Paulo: Sumaré: Editora Eletrometal S.A Metais Especiais, 1988.
27. POST, C. B.; EBERLY, W. S., Stability of austenite in stainless steels. *Trans of the A. S. M.*, v.39, p.868-890, 1947.
28. KUROMOTO, N. K. et al., Nanocratching characterization of austenitic stainless steel modified by cathodic hydrogenation. *Materials Science & Engineering A*, v.A269, p.83-89, 1999.
29. MANGONON JR, P. L.; THOMAS, G., The martensite phases in 304 stainless steel. *Metallurgical and Materials Transactions B*, v.1, p.1577-1586, 1970.
30. HASHIMOTO, H.; SUN, Z. M. ABE, T., Deformation behavior of stainless steel particles under compressive load. *Scripta Materialia*, v.49, p.997-1002, 2003.
31. MURR, L. E. et. al., Effects of deformation (strain) and heat treatment on grain boundary sensitization and precipitation in austenitic stainless steels. *Materials characterization*, v.24, p.133-185, 1990.
32. HUANG, C. A.; HEU, F. Y.; YAO, S. J., Microstructure analysis of the martensitic stainless steel surface fine-cut by the wire electrode discharge machining (WEDM). *Materials Science and Engineering A*, v.371, p.119-126, 2004.

33. TAVARES, S. S. M. et al., Phase transformation induced by severe plastic deformation in the AISI 304L Stainless Steel. *Materials Science and Engineering A*, v.358, p.32-36, 2003.
34. DASH, J.; OTTE, H. M., The martensitic transformation in stainless steel, *Acta Materialia*, v.11, p.1169-1178, 1983.
35. FERREIRA, P. J.; ROBERTSON, I. M.; BIRNBAUM, H. K., Hydrogen Effects on the Interaction Between Dislocations. *Acta Materialia*, v.46, p.1749-1757, 1998.
36. MEYERS, M. A.; CHAWLA, K. K., *Princípios de metalurgia mecânica*. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 1982.
37. SOUZA, S. A., *Ensaio mecânicos de materiais metálicos: Fundamentos teóricos e práticos*. 5. ed., Rio de Janeiro: Editora Edgard Blucher, 1984, cap. 1, 2, 4 e 5.
38. DIETER, G. E., *Metalurgia mecânica*. 2. ed., Rio de Janeiro: Editora Guanabara Koogan, 1976., cap. 1, 2, 3 e 4.
39. KURZYDLOWSKI, K. J., The test environment effect on the mechanical properties of austenitic stainless steels. *Materials Science and Engineering A*, p.234-236 e 1083-1086, 1997.
40. KASCHNER, G. C.; GIBELING, C., A study of the mechanism of cyclic deformation in f.c.c. metals using strain rate change tests. *Materials Science and Engineering A*, p.170-176, 2002.
41. PERALTA, J. L., Análise do efeito da deformação na formação da microestrutura e na rejeição de soluto durante a solidificação de placas finas, 2003. Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2003.
42. SILVA, A. L. C.; MEI, P. R. *Aços e ligas especiais*. 2. ed., São Paulo: Sumaré: Editora Eletrometal S.A. Metais Especiais, 1988, cap. 10.
43. BRESCIANE, E. F. et al, *Conformação plástica dos metais*. Campinas, Unicamp, 1991, cap. 1, 2 e 3.
44. AVITZUR, B., *Metal forming: processes and analysis*. New York: McGraw-Hill Book Company, 1968.

45. MORRIS, I.; JOE, L. *Processos de fabricação e materiais para engenheiros*. Rio de Janeiro: Editora Edgard Blucher, 1978, cap. 12 e 13.
46. CHIAVERINI, V., *Tecnologia mecânica: Estrutura e propriedades processos de fabricação*. [S.l.], Editora: Pearson Education do Brasil LTDA, 1977, v.1, cap.15.
47. YOSHIDA, K.; SHINOHARA, T., Deformation analysis of surface flaws in stainless steel wire drawing. *Journal of Materials Processing Technology*, p.162-163 e 579-584, 2005.
48. AMERICAM SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Microhardness of Materials: Designation e 384-89, *Anual book of ASTM standards*. Easton, v. 01.02, p. 02-18, 1990.
49. NAKANO, H. et. al., Mechanical properties of several nickel-Titanium alloy wires in three-point bending tests. *Americam journal of orthodontics and dentofacial orthopedics*, v.115, n.4, 1990.
50. AMERICAM SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Tension Testing of Metallic Materials. Designation: E 8 - 01^{é2}. *Anual book of ASTM standards*.
51. YOSHIDA, K. et. al., Drawing of stainless shaped steel microwire of 400-600µm size. *Wire Journal International*, p. 56-61, Mar., 2004.
52. GAUER, L. et al., A comparative dimensional analysis of stainless steel rectangular orthodontic wires, using a precision digital micrometer. *Rev. Odontologia UNICID*, v.15, n.1, p.35-45, 2003.

APÊNDICE

APÊNDICE A – Gráficos dos ensaios de tração e flexão dos fios no estado de como recebido.

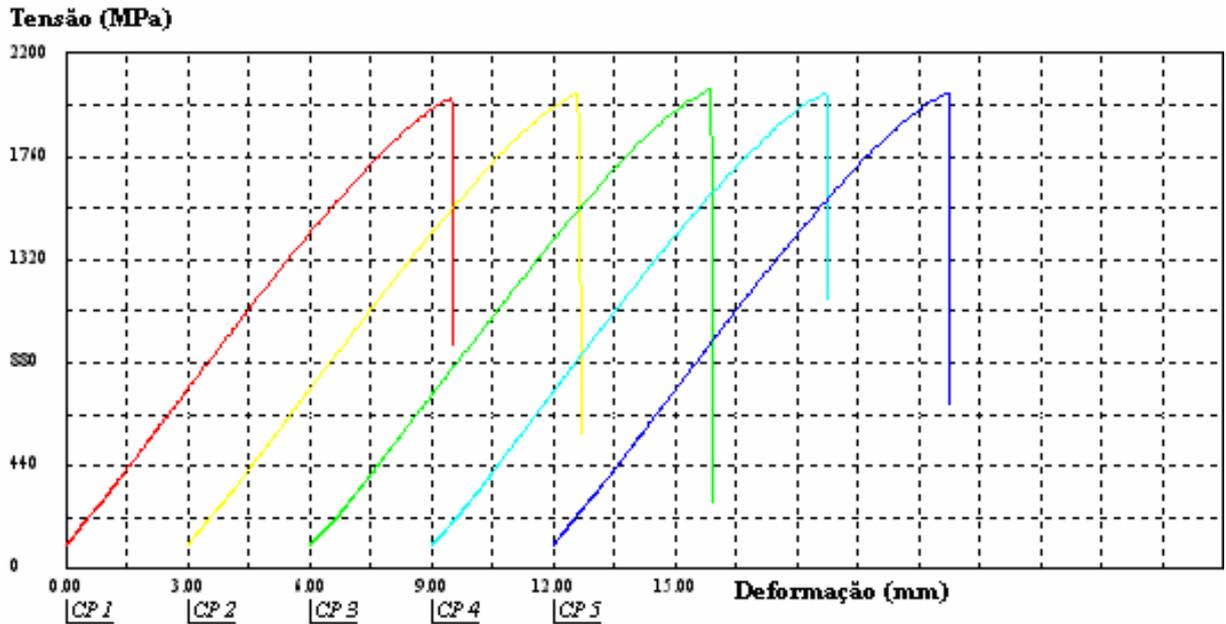


Figura A.1: Gráfico da Tensão X Deformação do fio com diâmetro de 0,45 mm como recebido.

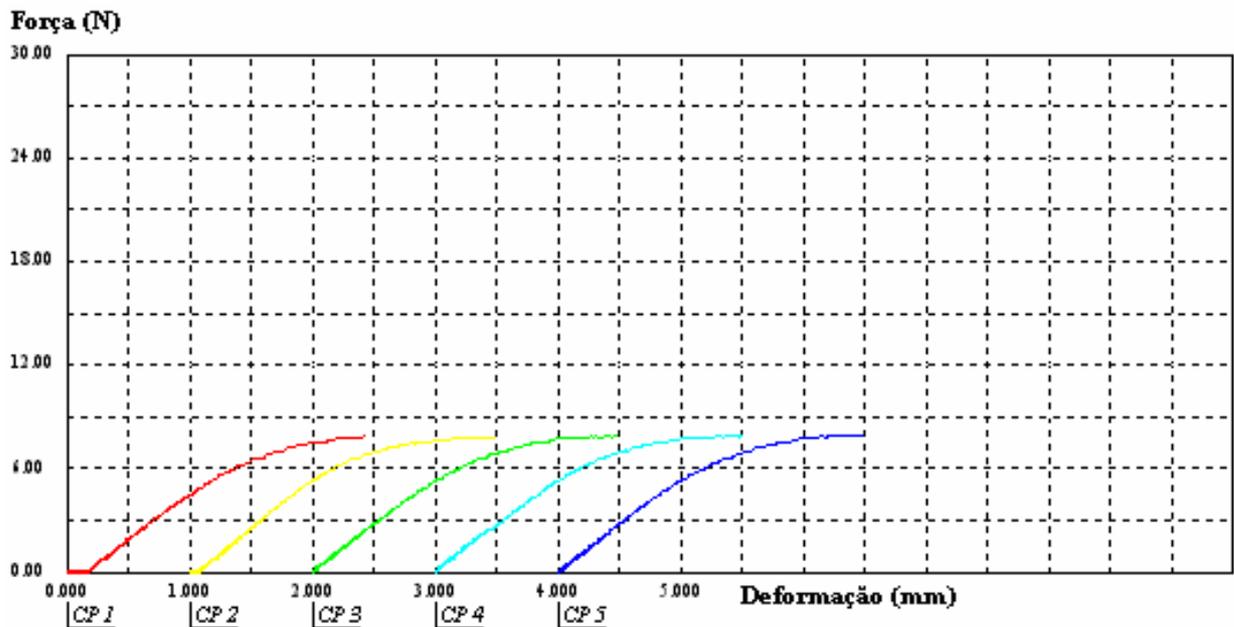


Figura A.2: Gráfico da Força X Deformação do fio com diâmetro 0,45 mm como recebido.

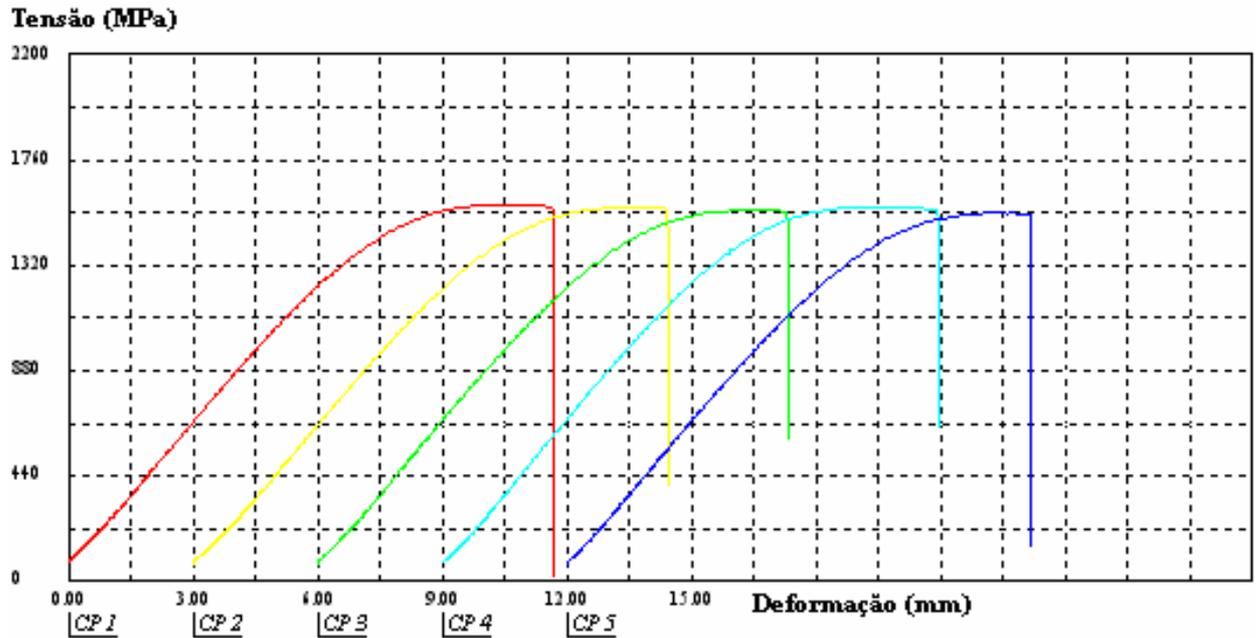


Figura A.3: Gráfico da Tensão X Deformação do fio 0,53 mm como recebido.

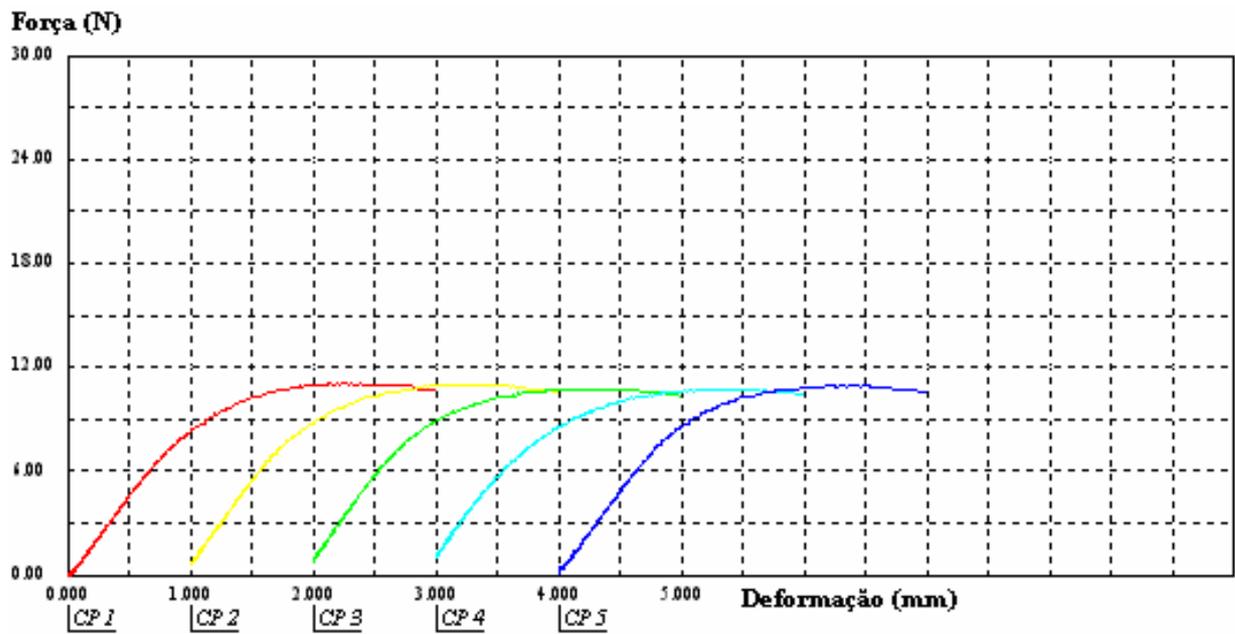


Figura A.4: Gráfico da Força X Deformação do fio com diâmetro de 0,53 mm como recebido.

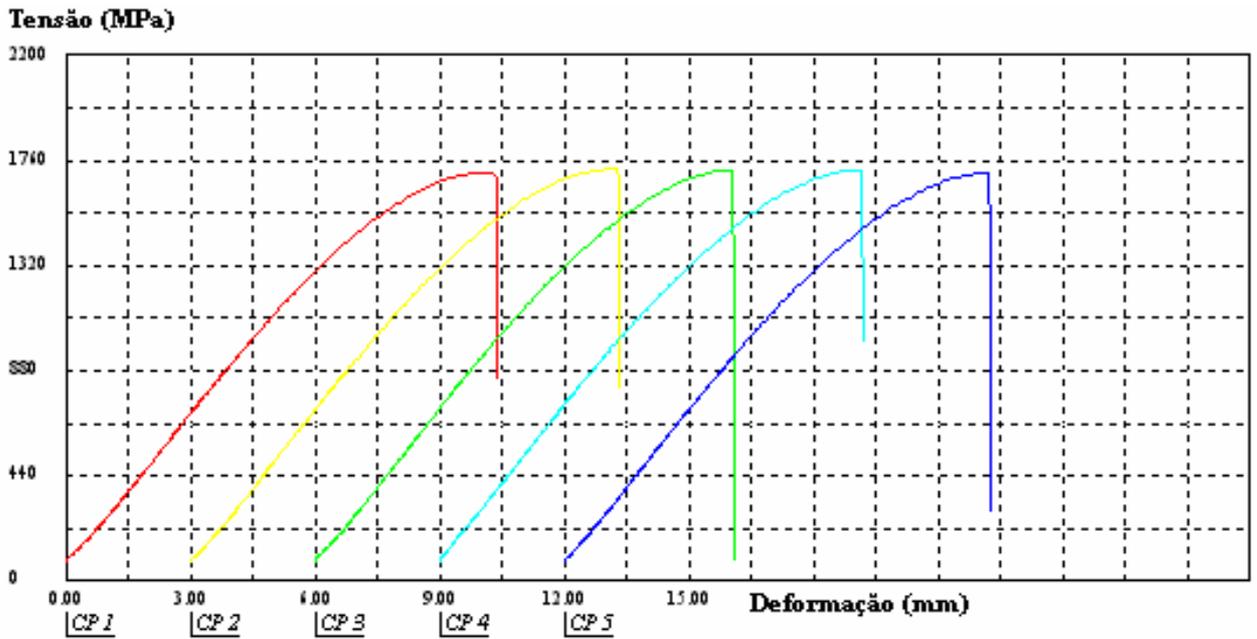


Figura A.5: Gráfico da Tensão X Deformação do fio com diâmetro de 0,59 mm como recebido.

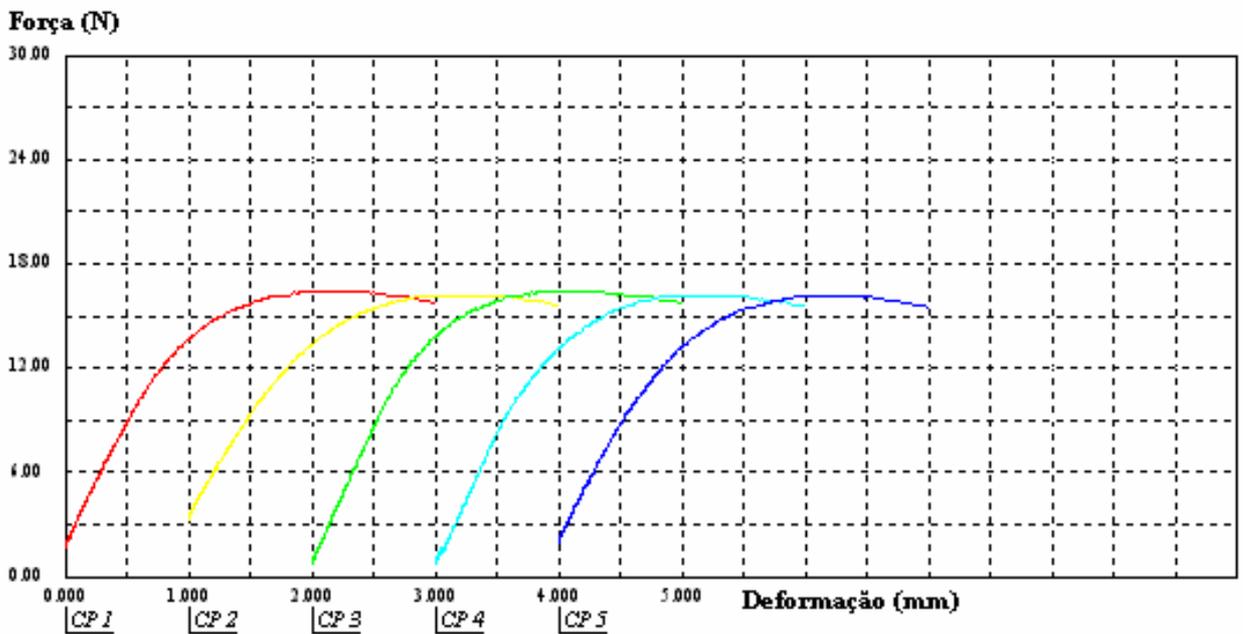


Figura A.6: Gráfico da Força X Deformação do fio com diâmetro de 0,59 mm como recebido.

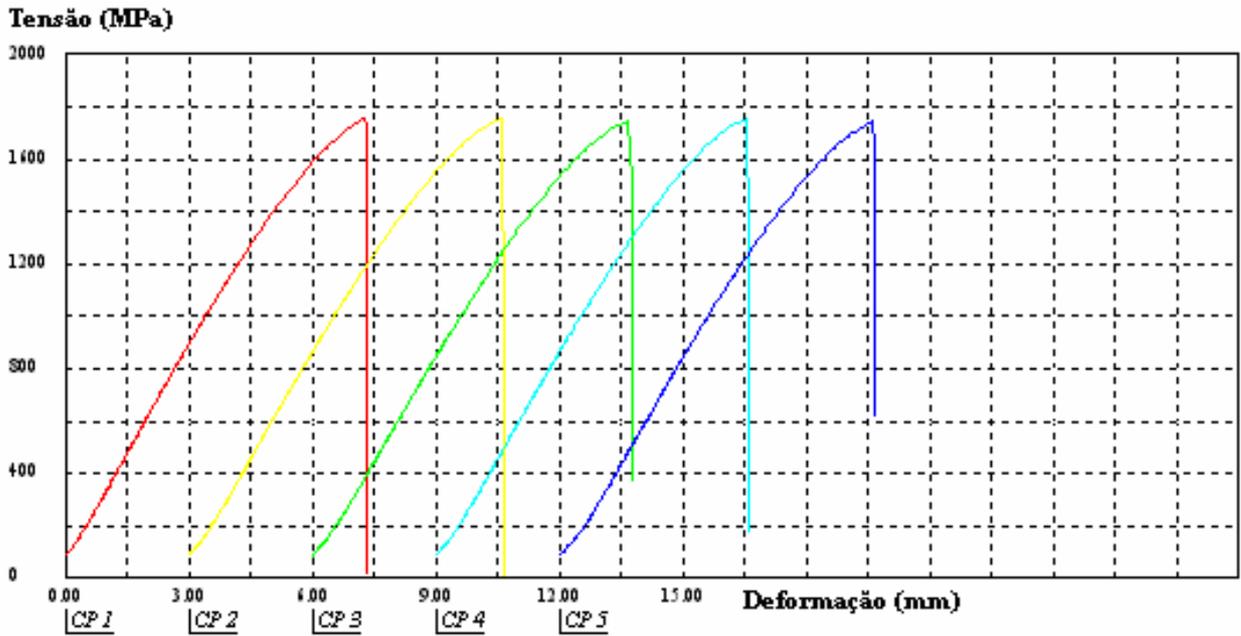


Figura A.7: Gráfico da Tensão X Deformação do fio com diâmetro 0,61 mm como recebido.

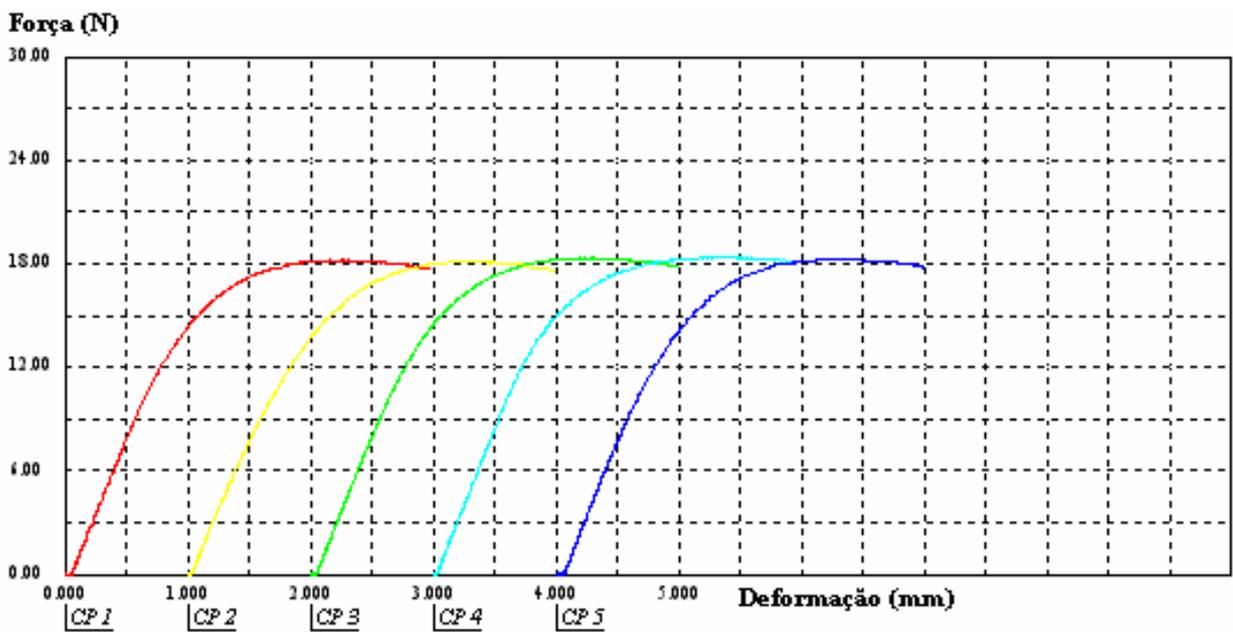


Figura A.8: Gráfico da Força X Deformação do fio com diâmetro 0,61 mm como recebido.

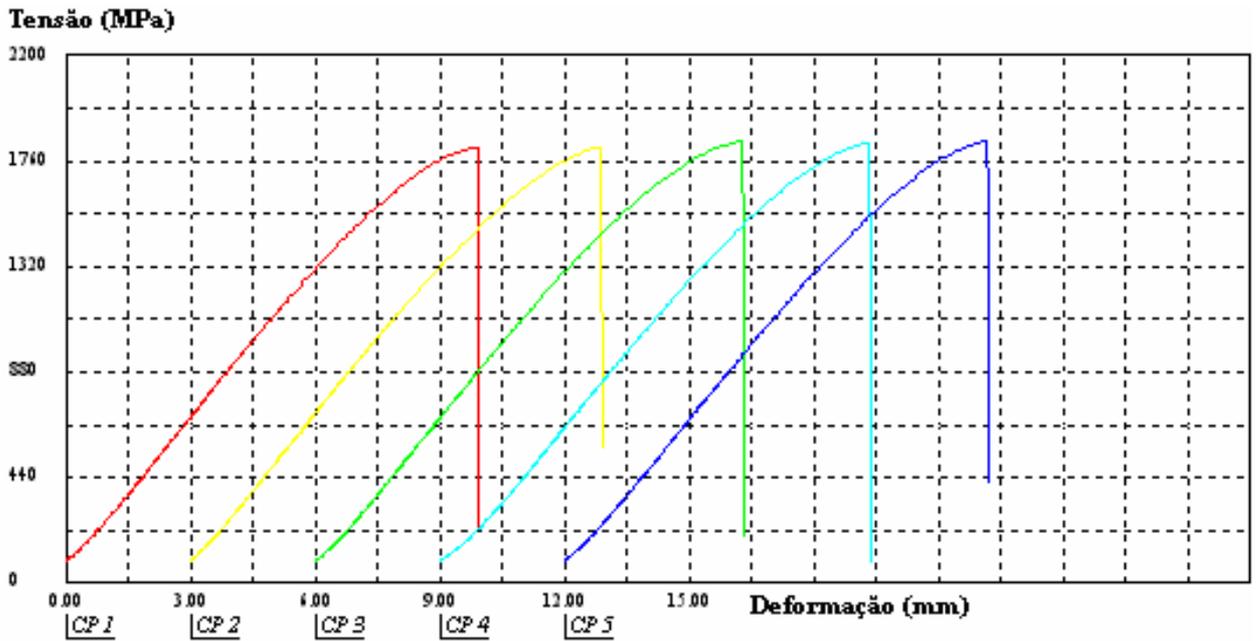


Figura A.9: Gráfico da Tensão X Deformação do fio com diâmetro de 0,62 mm como recebido.

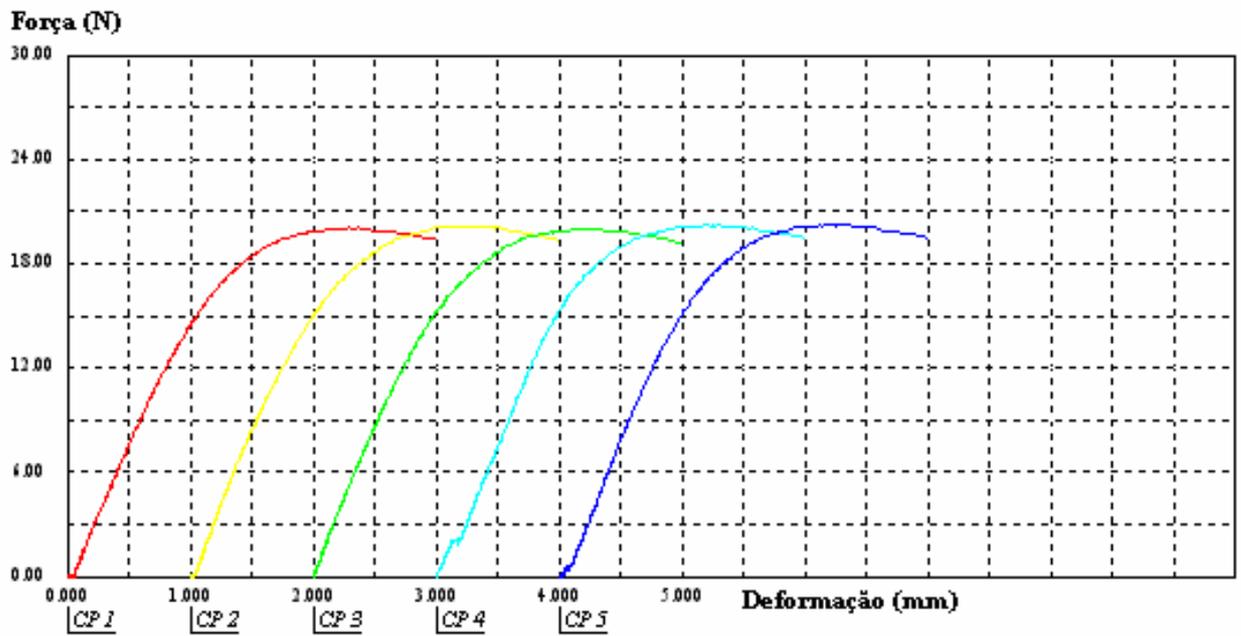


Figura A.10: Gráfico da Força X Deformação do fio com diâmetro de 0,62 mm como recebido.

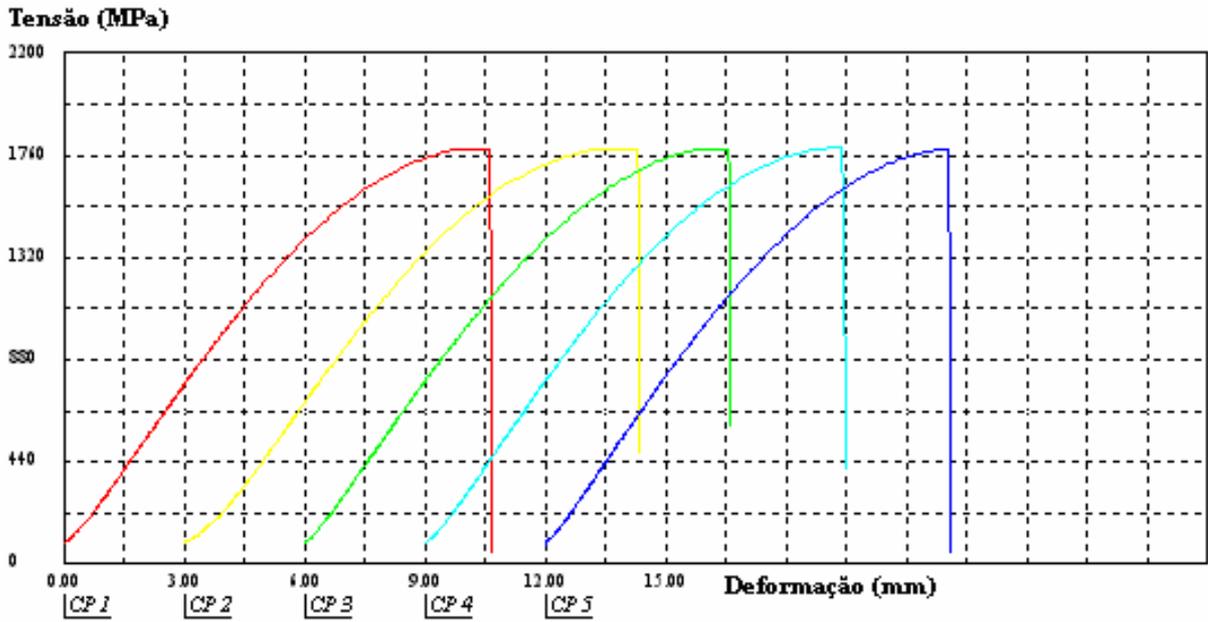


Figura A.11: Gráfico da Tensão X Deformação do fio com diâmetro de 0,65 mm como recebido.

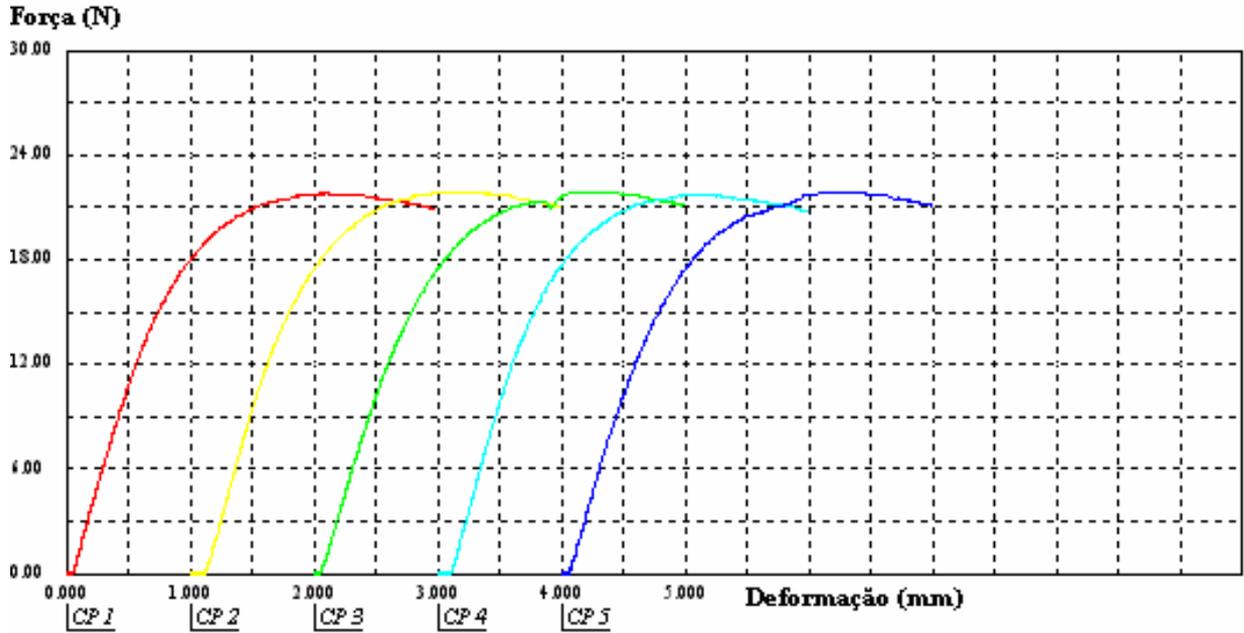


Figura A.12: Gráfico da Força X Deformação do fio com diâmetro de 0,65 mm como recebido.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)