

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO
SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA - DEMEC

**MONITORAMENTO ESTRUTURAL DE PÁS DE
ROTORES DE HELICÓPTEROS ATRAVÉS DA
UTILIZAÇÃO DE MATERIAIS INTELIGENTES**

Rosemere de Araujo Alves Lima

Rio de Janeiro

Junho de 2016

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO
SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

**MONITORAMENTO ESTRUTURAL DE PÁS DE ROTORES DE
HELICÓPTEROS ATRAVÉS DA UTILIZAÇÃO DE MATERIAIS
INTELIGENTES**

Rosemere de Araujo Alves Lima

Trabalho de conclusão de curso apresentado em cumprimento às Normas do Departamento de Educação Superior do CEFET/RJ, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Hector Reynaldo Meneses da Costa

Coorientadores: Juliana Primo Basílio de Souza

Ricardo Alexandre Amar de Aguiar

Rio de Janeiro

Junho de 2016

À minha família,
que sempre me apoiou, mesmo nos momentos de dificuldades, durante
toda a minha vida sempre me incentivando e fornecendo a educação
necessária para que eu pudesse trilhar meus objetivos.

Muito obrigada.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

L732 Lima, Rosemere de Araujo Alves

Monitoramento estrutural de pás de rotores de helicópteros através da utilização de materiais inteligentes / Rosemere de Araujo Alves Lima. —2016.

xviii, 76f. + apêndices e anexo : il. (Algumas color.), grafs., tabs., enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2016.

Bibliografia: f. 75-76

Orientador: Hector Reynaldo Meneses da Costa

Coorientadores: Juliana Primo Basílio de Souza

Ricardo Amar de Aguiar.

1. Engenharia mecânica. 2. Indústria aeronautica. 3. Rotores. 4. Fibras ópticas. 5. Sensores. I. Costa, Hector Reynaldo Meneses da (Orient.). II. Souza, Juliana Primo Basílio de (Coorient.). III. Aguiar, Ricardo Alexandre Amar de (Coorient.). IV. Título.

CDD 621

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por sempre me iluminar, confortar o meu coração e ter guiado todos os meus passos ao longo da vida.

À memória da minha mãe que estaria orgulhosa da pessoa que me tornei, ao meu pai Antonio Alves Lima e a minha madrasta Elania Lucia Rodrigues Afrizio Lima serei eternamente grata por terem me educado, lapidado meu caráter e por, apesar de todas as dificuldades que enfrentamos ao longo do caminho, sempre terem me apoiado.

Aos meus irmãos Isabel de Araujo Alves Lima e Gabriel Rodrigues Afrizio Alves Lima que são as joias da minha vida e me ensinaram de pequena a importância e a responsabilidade de saber dividir as coisas, além de me apresentarem o significado da amizade verdadeira.

A todos os amigos que fiz ao longo da faculdade, em especial a Débora Kelly e Victor Hugo que muito mais do que companheiros da vida acadêmica, se tornaram a família que escolhi para dividir todos os momentos da vida.

À equipe Venturi que me ensinou uma paixão (a aviação); auxiliou no meu amadurecimento acadêmico, profissional e pessoal; a todas as horas passadas na oficina; a cada lágrima derramada durante os voos e a todos os amigos que fiz durante 4 anos de projeto, em destaque Daniel Kawasaki, Jorge Neto, Guilherme Calazans, Felipe Eiras, Yuri Salles, Gabriel Rangel, Waldyr Leão e Ulisses Carneiro.

A minha segunda casa, Milano, e a todos os amigos que fiz durante o meu intercâmbio que puderam compartilhar comigo um dos anos mais incríveis e ricos de experiências da minha vida.

Ao Politecnico di Milano, em especial aos professores Paolo Bettini e Giuseppe Sala que me acolheram de braços abertos ao seu núcleo de pesquisa e me orientaram durante toda a minha estadia no Laboratório de Estruturas Aeroespaciais. Agradeço também, a Elena Borlandelli, Patrick Bogotto e Daniele Rocca que me acompanharam e ajudaram durante todo o desenvolvimento deste trabalho e a todos os técnicos do laboratório.

À CAPES e ao Ministério da Educação por terem financiado o meu intercâmbio através do programa Ciências Sem Fronteiras, os quais tornaram possível a execução deste trabalho.

Aos meus orientadores Hector Reynaldo, Juliana Basílio e Ricardo Aguiar que sempre acreditaram no meu potencial e me apoiaram ao longo das minhas escolhas acadêmicas; por terem ultrapassado as barreiras de educadores e se tornarem meus amigos. Em especial ao Hector que me acompanha desde o primeiro período e está diretamente ligado a todos os meus feitos acadêmicos, obrigada.

A todos os professores que por vocação nunca desistiram da sua profissão e são os grandes responsáveis pelas nossas conquistas pessoais e profissionais.

Ao CEFET/RJ por ter me concedido a oportunidade de frequentar a faculdade e futuramente o diploma de Engenheira Mecânica.

“ Una volta che abbiate conosciuto il volo, camminerete sulla terra guardando il cielo,
perchè là siete stati e là desiderete tornare ”.

(Leonardo da Vinci)

RESUMO

A indústria aeronáutica está em constante busca de inovações tecnológicas, com a finalidade de reduzir custos com manutenção e operação e aumentar a confiabilidade dos seus processos. A fim de atender as demandas desse setor, nos últimos anos, iniciou-se pesquisas para a implementação dos chamados materiais inteligentes. Esses novos materiais, cujas propriedades vão além das físicas e químicas, são capazes de desenvolver atividades funcionais sofisticadas, ou seja, geram ações de respostas de acordo com os estímulos recebidos. Alguns dos exemplos desses tipos de materiais são as estruturas compósitas com a presença de fibras-ópticas englobadas para a realização de monitoramento estrutural (*Structural Health Monitoring – SHM*). Desta forma, esse projeto tem como motivação o monitoramento térmico e estrutural realizado, em tempo real, nas pás de rotores de helicópteros. A metodologia empregada foi o estudo de interface entre o revestimento da fibra-ótica e a matriz do laminado, o desenvolvimento de um sistema de proteção da fibra-ótica durante a fabricação do material compósito laminado, além do aprimoramento da técnica de desacoplamento dos sinais dos sensores relacionados aos efeitos térmicos e mecânicos. Portanto, foram investigados diferentes tipos de fibras ópticas, utilizados por esse tipo de indústria, como as revestidas por poliacrilato, poliamida e, as mais recentes, fabricadas a partir de um revestimento cerâmico (Ormocer). E para a análise da adesão desses diferentes revestimentos realizou-se testes de *Pull-out* e análises microscópicas dos corpos de prova. Os resultados indicam que as fibras ópticas, cujo revestimento é cerâmico, são uma ótima alternativa quando comparadas àquelas que apresentam revestimentos tradicionais, pois apresentam uma qualidade de adesão equivalente ao de poliamida com a vantagem de possuírem um diâmetro menor e por consequência uma menor invasividade.

Palavras-chave: Materiais Inteligentes, Monitoramento, Fibras ópticas.

ABSTRACT

The aeronautic industry is always looking for technological innovations that can reduce maintenance and operation costs and increase the reliability of their processes. In order to meet the demands of this sector, actually, began researches and implementations of so-called smart materials. This new materials, whose proprieties are beyond the physical and chemical, are table to develop functional proprieties, actions generating responses according to be received stimulus. Some examples of these types of materials are composite structures in the presence of fiber optics encompassed for carrying out structural monitoring (Structural Health Monitoring – SHM). The motivation of this project is thermal and structural monitoring carried out on blades of Augusta Westland’s helicopter rotors. The implemented methodology was the study of the interface between the fiber optic coating and the laminate matrix, the development of a protection system for the fiber optics during the composite material construction, and also the improvement of sensor signal decoupling techniques related to the thermal and mechanical effect. Thus, different types of fiber optics where considered, all of which are used in this industry, such as fibbers coated with polyacrylate, polyamide and the more recent ones made from a ceramic coating (Ormocer). For the adhesion analysis of all of these different types of coating, pull-out tests and microscopic analysis of the samples were performed. The results indicate that the fiber optic with ceramic coating is an excellent alternative when compared with the more traditional coated fiber optics, since they have an adhesive quality equivalent to the polyamide coating with the added benefit of a smaller diameter and as such are less invasive.

Key words: Smart Materials, Monitoring, Fiber optics.

SOMMARIO

L'industria aeronautica è in costante ricerca di innovazione tecnologica, al fine di ridurre i costi di manutenzione e di funzionamento; e aumentare l'affidabilità dei suoi processi. Al fine di soddisfare le esigenze di questo settore, negli ultimi anni, ha iniziato la ricerca per la realizzazione dei cosiddetti materiali intelligenti. Questi nuovi materiali, in cui le proprietà sono al di là della fisica e chimica, sono in grado di sviluppare sofisticate attività funzionale, cioè, le azioni generando risposte in base allo stimolo ricevuto. Esempi di questi tipi di materiali sono strutture composite in presenza di fibre ottiche che comprendevano esercitare il controllo strutturale (*Structural Health Monitoring* - SHM). Pertanto, questo progetto è motivato dal monitoraggio termico e strutturale effettuato in tempo reale, nelle pale di rotori di elicotteri. La metodologia impiegata è stata lo studio dell'interfaccia del rivestimento della fibra ottica e la matrice del laminato, lo sviluppo di un sistema di protezione in fibra ottica durante la fabbricazione del materiale composito laminato, oltre al disaccoppiamento tecnica di miglioramento dei segni di sensori relativi agli effetti termici e meccanici. Pertanto, è stato studiato diversi tipi di fibre ottiche, utilizzate per questo tipo di industria, come poliacrilato, poli-immide, e il più recente fabbricata con un rivestimento ceramico (Ormocer). E per l'analisi dell'adesione di questi diversi rivestimenti è stato fatto i test di *Pull-out* e le analisi microscopica dei campioni. I risultati indicano che la fibra ottica, che il rivestimento è in ceramica, è una buona alternativa rispetto a coloro che hanno rivestimenti tradizionali, poiché ha una qualità di adesione equivalente a quella della poli-immide con il vantaggio di avere un diametro minore e quindi un invasività più piccola.

Parole chiave: Smart Materials, monitoraggio, fibre ottiche.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	xiii
LISTA DE TABELAS	xvi
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xvii
LISTA DE SÍMBOLOS	xviii
Capítulo 1	1
Introdução	1
1.1 Motivação	2
1.2 Metodologia	3
1.3 Organização do Trabalho	4
Capítulo 2	5
Monitoramento Estrutural	5
2.1 Estratégias de Monitoramento	7
2.1.1 Fase de Monitoramento	8
2.1.2 Fase de Diagnóstico	9
2.1.3 Fase de Prognóstico	9
2.2 Principais Tecnologias SHM	10
2.2.1 <i>Acoustic-Ultrasonic</i> (AU)	11
2.2.2 <i>Sensitive Coatings</i> (SC)	11
2.2.3 <i>Strain Gauges</i> (SG)	11
2.2.4 <i>Environmental Degradation Monitoring Sensors</i> (EDMS)	12
2.2.5 <i>Microwave Sensors</i>	12
2.2.6 <i>Comparative Vacuum Monitoring</i> (CVM)	12
2.2.7 <i>Imaging Ultrasonics</i> (IU)	13
2.2.8 <i>Electro-Magnetic Interference</i> (EMI)	13
2.2.9 <i>Fiber Bragg Gratings</i> (FBG)	13
2.3 Comparação entre Principais Tecnologias SHM	14
Capítulo 3	15
Sensores a Fibra Ótica	15
3.1 Teoria Envolvida nas Fibras Óticas	16
3.2 Retículo de Bragg	17
3.3 Relação Foto-termo-elástica	19
3.4 Sistema de Isolamento Mecânico Através de Tubo Capilar Não Passante	21

3.5	Englobamento de Fibras Óticas	22
3.5.1	Englobamento Através de <i>Quick-Pack</i>	23
3.5.2	Englobamento Direto	24
Capítulo 4	.....	25
	Tecnologia Desenvolvida para a Identificação e Proteção de Sensores de Fibra Ótica	25
4.1	Identificação do Posicionamento do Sensor FBG na Fibra Ótica	25
4.1.1	Procedimentos Utilizados.....	27
4.1.1.1	Posicionamento das Fibras Óticas Durante o Teste.....	27
4.1.1.2	Paralelismo Entre a Chapa de Alumínio e a Fonte Térmica.....	28
4.1.1.3	Definição dos Parâmetros de Teste	28
4.1.1.3.1	Variação do Comprimento de Onda do Sensor <i>Starter</i>	28
4.1.1.3.2	Altura entre a Chapa de Alumínio e os Sensores de Fibra Ótica	29
4.1.1.3.3	Altura da Fonte de Calor	29
4.1.1.3.4	Aquecimento Percentual do Fio Quente e Velocidade de Avanço.....	30
4.1.1.4	Execução dos Ensaios.....	30
4.2	Sistema de Proteção da F.O. Durante a Laminação	30
4.2.1	Preparação dos Sensores para Englobamento	31
4.2.2	Proteção da Saída da Fibra Ótica	33
4.2.2.1	Inserto Metálico para <i>By-Pass</i>	34
4.2.2.2	Molde para Fabricação de Corpos de Prova Planos	36
Capítulo 5	.....	41
	Estudo da Adesão dos Diferentes Tipos de Fibra Ótica	41
5.1	Teste de <i>Pull-Out</i>	41
5.2	Requisitos para Execução do Teste	43
5.3	Molde Projetado.....	44
5.4	Fabricação dos Corpos de Prova.....	45
5.5	Tipos de Amostras	48
5.6	Execução dos Testes	49
5.7	Microscopia Ótica e Eletrônica de Varredura.....	50
Capítulo 6	.....	52
	Análise dos Resultados	52
6.1	Posicionamento do Sensor FBG	52
6.2	Resultados do Teste de <i>Pull-out</i>	59
6.2.1	Fibras de Revestimento em Ormocerâmica - 115 μ m.....	60
6.2.2	Fibras de Revestimento em Ormocerâmica - 220 μ m.....	63

6.2.3	Fibras de Revestimento em Poliacrilato.....	65
6.2.4	Fibras de Revestimento em Poliamida.....	67
6.3	Microscopia Ótica e Eletrônica de Varredura.....	68
6.3.1	Microscopia Ótica	68
6.3.2	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	70
6.4	Entendimentos Gerais	72
Capítulo 7	.....	73
Conclusões.....	.....	73
7.1	Sugestões para Trabalhos Futuros	74
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	.....	75
APÊNDICE .....	.....	77
A.1	Script MATLAB – Análise de Adesão.....	77
A.2	Script MATLAB – Identificação dos Sensores	82
ANEXOS.....	.....	89
Desenhos Técnicos dos Moldes Projetados.....	.....	89

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Rotor AW-139 [2].....	2
Figura 2: Similaridade entre SHM e o Sistema Nervoso Humano [6].....	6
Figura 3: Funcionamento de um Sistema SHM [10].....	8
Figura 4: Utilização de Compósitos no Boeing 787 [13].....	10
Figura 5: Strain Gauge [14].....	11
Figura 6: Sensor CVM [15].....	12
Figura 7: Sensor de Fibra Ótica [16].	13
Figura 8: Camadas Fibra ótica [19].	15
Figura 9: Representação da Lei de Snell [3].....	16
Figura 10: (a) Refração e (b) Reflexão completa [17].....	17
Figura 11: Funcionamento Retículo de Bragg [20].....	18
Figura 12: Tipos de sensores FBG [3].....	19
Figura 13: Sistema de Isolamento [3].....	22
Figura 14: Exemplo de Quick-Pack [17].....	23
Figura 15: Esquemática do Teste pela Aproximação da Fonte Térmica.	26
Figura 16: Metodologia para identificação dos sensores FBG.....	26
Figura 17: Disposição das Fibras Óticas sobre Chapa de Alumínio.	27
Figura 18: Esquema de Execução dos Testes.....	30
Figura 19: Tubo Capilar Após o Corte.	31
Figura 20: Tubo Capilar Após Lixamento.....	32
Figura 21: Sensor Isolado para Desacoplamento Térmico.....	32
Figura 22: Utilização de Guias de PEEK para Proteção de Fibras Óticas.	33
Figura 23: Esquema do Molde de Proteção da Fibra Ótica.	34
Figura 24: By-Pass bi cônico.....	34
Figura 25: Insertos Metálicos Bipartidos.	35
Figura 26: Teste de Vedação.	35
Figura 27: Projeto do Molde - Software utilizado Solid Works.....	37
Figura 28: Estampo para Fabricação do Laminado.	38
Figura 29: Autoclave do Dep. de Estruturas Aeroespaciais do Politecnico di Milano [21].....	38
Figura 30: Saída Excessiva de Resina Através do By-pass.....	39
Figura 31: Produção do Laminado.	39

Figura 32: Laminado com SHM.....	39
Figura 33: Tensão Máxima de Cisalhamento entre as Interfaces [22].	42
Figura 34: (a) FBC e (b) RTC [22].....	43
Figura 35: Blocos de Resina Para Teste de Pull out.....	44
Figura 36: Utensílio Para Fabricação de Corpos de Prova.....	45
Figura 37: Fixação dos Suportes das Fibras no Molde.....	46
Figura 38: Detalhe da Fabricação dos Corpos de Prova.....	46
Figura 39: Corpos de Prova Após Retirada do Molde.....	47
Figura 40: Placa de Fibra de Vidro utilizada como Suporte.....	47
Figura 41: Corpos de Prova Para Teste de Pull-out.....	48
Figura 42: Máquina Instron para Teste de Pull out.	49
Figura 43: Deposição Química Assistida por Plasma.	50
Figura 44: (a) Sensor Ormocerâmico, Vel. 4mm/s e (b) Sensor Ormocerâmico, Vel. 8mm/s.	53
Figura 45: (a) Sensor Ormocerâmico, Vel. 13,3mm/s e (b) Sensor Ormocerâmico, Vel. 16mm/s.	54
Figura 46: (a) Sensor Poliacrilato, Vel. 4mm/s e (b) Sensor Poliacrilato, Vel. 8mm/s.....	54
Figura 47: (a) Sensor Poliacrilato, Vel. 13,3mm/s e (b) Sensor Poliacrilato, Vel. 16mm/s.....	55
Figura 48: (a) Sensor FBG ₁ – Poliacrilato e (b) Sensor FBG ₂ - Poliamida.	56
Figura 49: (a) Sensor FBG ₃ – Ormocerâmica e (b) Sensor FBG ₄ - Ormocerâmica.....	56
Figura 50: (a) Posição Sensor FBG ₁ e (b) Posição Sensor FBG ₂	58
Figura 51: (a) Posição Sensor FBG ₃ e (b) Posição Sensor FBG ₄	58
Figura 52: Gráfico Força x Deslocamento - 115µm.....	60
Figura 53: Medição da Profundidade de Englobamento da Fibra Após o Teste.....	61
Figura 54: Relação entre a Tensão de Cisalhamento e a Força Máxima de Ruptura Mostrando o Comprimento Crítico de Englobamento Fibra de 115µm.	62
Figura 55: Gráfico Força x Deslocamento - 220µm.....	63
Figura 56: Relação entre a Tensão de Cisalhamento e a Força Máxima de Ruptura Mostrando o Comprimento crítico de Englobamento Fibra de 220µm.	64
Figura 57: Gráfico Força x Deslocamento - poliacrilato.....	65
Figura 58: Relação entre a Tensão de Cisalhamento e a Força Máxima de Ruptura Mostrando o Comprimento crítico de Englobamento Fibra de poliacrilato.	67
Figura 59: Comportamento Plástico Revestimento de Poliacrilato.....	69
Figura 60: (a) Fibra de 115µm e (b) Fibra de 220µm.	69

Figura 61:(a) Interface cladding/coating e (b) Interface revestimento/matriz.....	70
Figura 62: Detalhe da Cavidade - Revestimento de Poliacrilato.....	70
Figura 63: (a) Fibra de 115 μ m e (b) Fibra de 220 μ m.	71
Figura 64: Detalhe da Cavidade - Fibra 220 μ m, Revestimento de Ormocerâmica.....	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tempo de Inspeção de um Avião Militar [6].	6
Tabela 2: Comparação Tecnologias SHM [17].	14
Tabela 3: Tipos de Amostras Analisadas.	48
Tabela 4: Comprimentos de Onda Padrão de cada FBG.	52
Tabela 5: Dados Utilizados no Teste.	53
Tabela 6: Confronto entre dados experimentais e Teóricos.	59
Tabela 7: Dados Fibra de 115 μ m.	62
Tabela 8: Dados Fibra de 220 μ m.	64
Tabela 9: Dados Fibra de poliacrilato.	66
Tabela 10: Dados Fibra de poliamida.	68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AU – *Acoustic-Ultrasonic*;

CH – Chanel;

CNC – Comando Numérico Computadorizado;

CVM – *Comparative Vacuum Monitoring*;

EDMS – *Enviromental Degradation Monitoring Sensors*;

EMI – *Electro-Magnetic Interference*;

FBC – *Fixed Bottom Contrain*;

FBG – *Fiber Bragg Gratings*;

IU – *Imaging Ultrasonics*;

LMME – Laboratório Multiusuário de Microscopia Eletrônica;

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura;

PACVD – *Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition*;

PEEK – *Polyether ether ketone*;

PTFE – Politetrafluoretileno;

RTC – *Restrained Top Constrain*;

SC – *Sensitive Coatings*;

SG – *Strain Gauges*;

SHM – *Structural Health Monitoring*;

TIR – Reflexão Total Interna;

UFF – Universidade Federal Fluminense.

LISTA DE SÍMBOLOS

d – Diâmetro da fibra;

$F_{\text{máx}}$ – Força máxima registrada ao longo do teste;

h – Distância de aplicação da fonte de calor;

K_e e K_T – Constantes de proporcionalidade características do sensor;

L_c – Comprimento crítico de englobamento;

l_e – Comprimento da fibra inserido no cubo de resina;

NA – Abertura numérica;

p_{11} e p_{12} – coeficientes de Pockel, ou seja, do tensor ótico-elástico;

Q – Potência da fonte de calor;

V_{scan} – Velocidade de avanço;

λ_B – Comprimento de onda central do espectro luminoso;

Λ – Espaço entre os planos dielétricos do retículo;

$\Delta\eta_{\text{eff}}$ – variação do índice de refração efetivo;

$\Delta\Lambda$ – variação do passo entre os planos que compõe o retículo de Bragg;

ϵ_1 – deformação sofrida pela fibra;

ϵ_2 – deformação radial do sensor;

η – Índice de refração do meio;

η_{eff} – Índice de refração eficaz do retículo;

θ – Ângulo entre a reta normal a superfície de incidência e os raios luminosos;

$\Theta_{\text{máx}}$ – Ângulo máximo de abertura;

σ_{rf} – Tensão máxima de ruptura da fibra;

τ_{iss} – Tensão máxima de cisalhamento da interface;

Capítulo 1

Introdução

As novas pesquisas referentes ao desenvolvimento de materiais para a indústria aeroespacial estão investindo em materiais capazes de identificar e mensurar, com antecedência e confiabilidade, o surgimento e propagação de defeitos na sua estrutura. Dessa forma, a comunidade científica está cada vez mais ampliando esforços na busca por tecnologias e dispositivos capazes de monitorar a integridade das estruturas (*Structural Health Monitoring – SHM*).

Uma das possíveis formas encontradas para a identificação e monitoramento de defeitos nas estruturas está no uso de dispositivos capazes de fazer uma leitura da integridade do material e transmiti-la, em tempo real, para um dispositivo externo que irá captar e validar o sinal recebido. A aplicação de materiais compósitos como matriz para o englobamento desses sensores e atuadores tem sido bastante recorrente, seja devido a heterogeneidade desse grupo e pela sua facilidade de englobamento, proporcionada seja pelo seu método de fabricação: laminação de um determinado número de estratos de fibra compósita, seja pelo interesse na investigação do comportamento a falha desses materiais que ainda não é pouco conhecido, como é o caso dos materiais metálicos [1].

O englobamento de sensores e atuadores no interior de matrizes compósitas tem como principais vantagens: a proteção dos dispositivos de monitoramento contra os efeitos do ambiente, possibilitando uma maior confiabilidade nos resultados transmitidos e maior durabilidade dos dispositivos em si. O monitoramento pode ser feito desde a fase de produção da peça até a sua operação, podendo ser aplicado em lugares antes de difícil acesso para a implantação dos sensores e em lugares, anteriormente, não aplicáveis devido a aerodinâmica. Porém, apresenta como principais desvantagens, em especial no emprego de sensoriamento por meio de sensores de fibra ótica, a dificuldade de manuseio das mesmas devido a sua fragilidade a ruptura, além de suas dimensões reduzidas e por consequência a sua implementação em escala industrial de produção.

1.1 Motivação

A indústria de helicópteros é um dos setores que mais apresenta interesse e investe na utilização de materiais inteligentes, principalmente aqueles cuja matriz é compósita, já que um dos seus componentes mais críticos, as pás dos rotores, é constituído desta matriz.

Ao longo dos anos, a aplicação de materiais compósitos para a fabricação das pás facilitou o englobamento de sensores na sua estrutura. Estes por sua vez, são de extrema importância para a avaliação da integridade estrutural da longarina, elemento responsável pela resistência aos principais carregamentos sofridos durante a operação das pás. Para a realização desse tipo de englobamento as principais fabricantes de helicópteros desenvolveram diferentes técnicas de fabricação e operação dos materiais inteligentes.

Visualizando a técnica que a Augusta Westland, empresa Anglo-italiana produtora de helicópteros, já vem implantando nos sistemas de monitoramento das pás dos rotores de cauda dos seus helicópteros AW-139 (Figura 1), surgiu o interesse de realizar este trabalho com o objetivo de otimizar o processo até então empregado, por meio da utilização de fibras óticas de diferentes revestimentos e diâmetros, além do desenvolvimento de técnicas para a manipulação e proteção dos sensores que serão englobados em carbono, projeto esse que foi desenvolvido juntamente com os professores doutores Giuseppe Sala e Paolo Bettini e o mestrando Daniele Rocca do Departamento de Estruturas Aeroespaciais, do Politecnico di Milano.

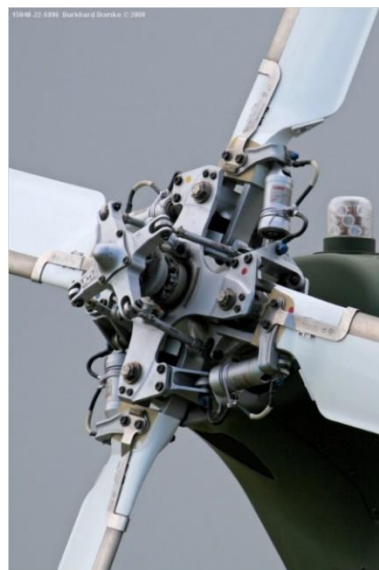


Figura 1: Rotor AW-139 [2].

1.2 Metodologia

O desenvolvimento deste projeto teve início através de um estudo detalhado sobre os vários tipos de monitoramento estrutural em materiais compósitos e dos sensores empregados. Logo após, foram analisadas as técnicas já existentes para a manipulação e englobamentos dos sensores em fibra ótica.

Diferente das fibras de poliamida e poliácrlato, comumente usadas para esse tipo de aplicação, optou-se pela utilização de fibras óticas de dimensões reduzidas e que apresentam um novo revestimento de material cerâmico denominada Ormocer®. Devido a sua dimensão reduzida estas fibras apresentam uma pequena invasividade à estrutura do laminado, já o revestimento cerâmico proporciona a fibra uma menor atenuação dos sinais durante sua operação.

A técnica de englobamento adotada foi a de desacoplamento dos sinais referentes aos efeitos térmicos e mecânicos desenvolvido por Tessadori [3], que determina a utilização de dois sensores de fibra ótica, dentre os quais um é coberto por um tubo capilar, selado nas extremidades por uma resina epóxi, enquanto o outro sensor está livre. A presença deste tubo capilar pode ser um fator propagador de trincas, logo o mesmo deve ser de um material cuja adesão com a matriz seja boa e apresente as menores dimensões possíveis. Portanto, desenvolveu-se uma técnica capaz de identificar com maior precisão a posição do sensor ao longo da fibra ótica e um estudo sobre o tipo de tubo capilar a ser empregado e a sua manufatura.

A adesão entre a interface do revestimento da fibra ótica e a matriz do laminado é um fator determinante para a confiabilidade e eficiência dos sistemas englobados de monitoramento estrutural, pois garantem a distribuição dos carregamentos sofridos pela estrutura ao sensor. Logo, para o estudo da adesão entre as interfaces foram realizadas as seguintes etapas: projeto de um molde para a produção de corpos de prova padronizados, testes de *Pull-out*, análise dos dados obtidos e microscopia eletrônica de varredura.

E por fim, desenvolveu-se um mecanismo de proteção da saída da fibra ótica durante o processo de fabricação do laminado. Para tal, projetou-se um molde, no qual estão presentes enxertos metálicos bipartidos com uma película de silicone que exerce o papel de by-pass impedindo que a resina, presente nas camadas de compósito pré-impregnado, ultrapassem o enxerto e dessa forma proteja a fibra ótica que posteriormente será conectorizada.

1.3 Organização do Trabalho

Este trabalho está dividido em 7 capítulos, incluindo o capítulo introdutório. A revisão bibliográfica está descrita no capítulo 2, cujo assunto abordado são os principais tipos de monitoramento estrutural existentes e seus conceitos. O capítulo 3 destina-se a caracterização dos sensores de fibra ótica e a explanação sobre a técnica de desacoplamento dos sinais de efeito térmico e mecânico empregada. Seguido pelos capítulos correspondentes a metodologia e testes realizados, capítulo 4 que descreve o processo desenvolvido para a proteção dos sensores durante a laminação dos corpos de prova, explana sobre o método de identificação dos sensores e a tecnologia utilizada na manipulação dos mesmos; e o capítulo 5 destinado aos testes referentes a problemática da adesão entre diferentes tipos de fibra ótica e a resina epoxídica. Finalmente o capítulo 6 com os resultados e o capítulo 7 com conclusões e sugestões para trabalhos futuros. Além da bibliografia e em anexo os desenhos técnicos dos equipamentos projetados para auxiliar na execução dos testes.

Capítulo 2

Monitoramento Estrutural

O segmento aeronáutico está aprimorando a eficiência e segurança dos seus processos e produtos, além de uma redução geral dos seus custos diretos com operação e manutenção.

O aumento da eficiência nos veículos aeronáuticos se dá principalmente pela redução da carga paga das aeronaves e, por consequência, um decréscimo do consumo de combustíveis e dos gastos com a operação. Isso ocorre devido a utilização de materiais mais leves e cujas propriedades mecânicas são otimizadas e/ou maiores quando comparadas aos materiais tradicionais.

Outro fator que possui grande influência na necessidade de redução dos custos do ciclo de vida desses tipos de veículo são os gastos referentes a manutenção. Embora a filosofia de manutenção venha passando por inovações, ainda assim é muito comum a utilização da manutenção preditiva, ou seja, com intervalos de parada de máquina programados baseados em previsões pessimistas do crescimento de danos e em modelos de ciclos de carregamento atuantes sobre as estruturas [4], além do constante número de paradas não programadas que tendem a crescer com o aumento da vida operacional dos veículos.

Com a finalidade de reduzir ao máximo essas ocorrências e otimizar a identificação e previsão de defeitos nas estruturas foi elaborado um novo modelo de manutenção denominado de *Structural Health Monitoring* (SHM), ou seja, sensores e atuadores são integrados nos materiais das estruturas avaliadas para que, de forma similar ao que ocorre com o sistema nervoso do corpo humano, possam detectar a presença de danos, mudanças comportamentais e enviá-las em tempo real ao cérebro, unidade responsável pela captação e decodificação dos dados emitidos pelos sensores [5], conforme Figura 2 [6].

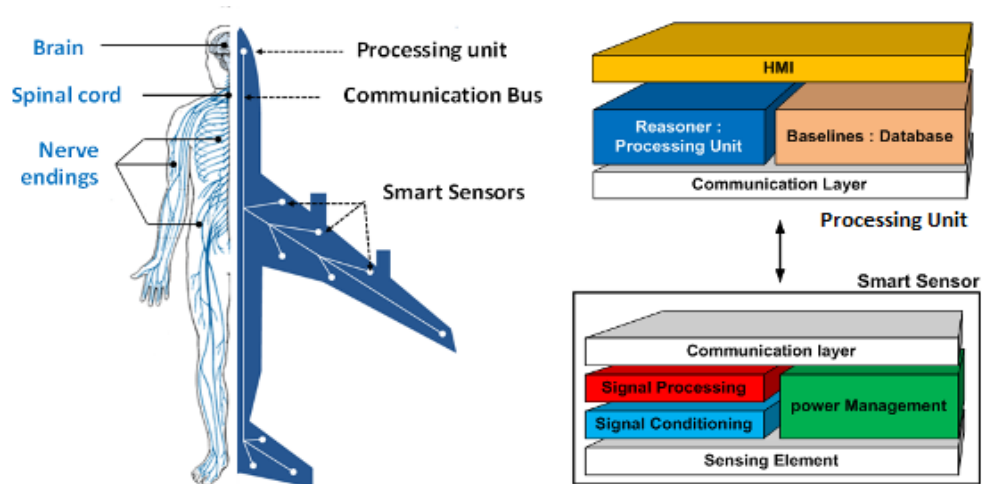


Figura 2: Similaridade entre SHM e o Sistema Nervoso Humano [6].

O monitoramento da integridade dos materiais tem proporcionado um aumento da vida útil dos componentes analisados, uma melhor descrição do histórico de cargas e esforços sobre a estrutura, um acompanhamento mais detalhado dos esforços que a estrutura está submetida desde a sua produção, identificando possíveis falhas no próprio processo produtivo, e uma maior confiabilidade na previsão e acompanhamento da propagação de danos, devido à redução de falhas ocasionadas da má avaliação das técnicas tradicionais de inspeção não destrutiva de elementos.

Um estudo recente [7] sobre a diminuição do tempo destinado a parada de manutenção em um avião militar que faz uso de sistemas de monitoramento inteligente apresentou um percentual de até 44% na economia de tempo durante a manutenção de equipamentos dotados de sistemas de monitoramento inteligentes, conforme os dados da Tabela 1 [6].

Tabela 1: Tempo de Inspeção de um Avião Militar [6].

Tipo de Inspeção	Duração (% do total)	Redução com SHM (%)	Tempo poupado (% do Total)
Linha de voo	16	40	6,4
Programada	31	45	14
Não programada	16	10	1,6
Atividades de serviço	37	60	22,2
	100		44,0

Apesar das vantagens na aplicação da SHM, a sua implantação nas mais variadas estruturas ainda é um desafio devido aos seguintes fatores [3]:

- Elevado custo inicial para a implantação devido a aquisição de sensores, dispositivos de captação do sinal, alteração no processo produtivo e capacitação da mão de obra;
- Desenvolvimento de novas técnicas para o englobamento dos sensores e atuadores nas estruturas, técnicas essas que, atualmente, são substancialmente manuais aumentando o tempo produtivo;
- A incerteza da vida útil dos sensores englobados e confiabilidade de leitura da integridade estrutural em relação a vida útil dos componentes;
- Dificuldade na manutenção de sensores englobados a estrutura;
- A presente dúvida em relação a como fazer a implementação de todo o aparato sensorial e sua influência na invasividade nas estruturas nas quais os sensores estão implantados, justamente devido à falta de bibliografias e técnicas difundidas mundialmente.

As atuais dificuldades na implantação dos sistemas de monitoramento inteligentes funcionam como estímulo para a produção científica mundial, que a cada ano vem desenvolvendo novas pesquisas e soluções para os problemas apresentados.

2.1 Estratégias de Monitoramento

As principais atividades a serem consideradas no planejamento estratégico de monitoramento são [8] apud [9]: a definição do objetivo do monitoramento; seleção do sistema de monitoramento, sensores e atuadores mais apropriados; projeto de fixação e/ou englobamento dos sensores na estrutura avaliada; determinação dos softwares e códigos matemáticos utilizados na leitura dos dados e a estimativa de custos.

As estratégias de monitoramento estrutural podem ser divididas conforme o diagrama da Figura 3 [10].

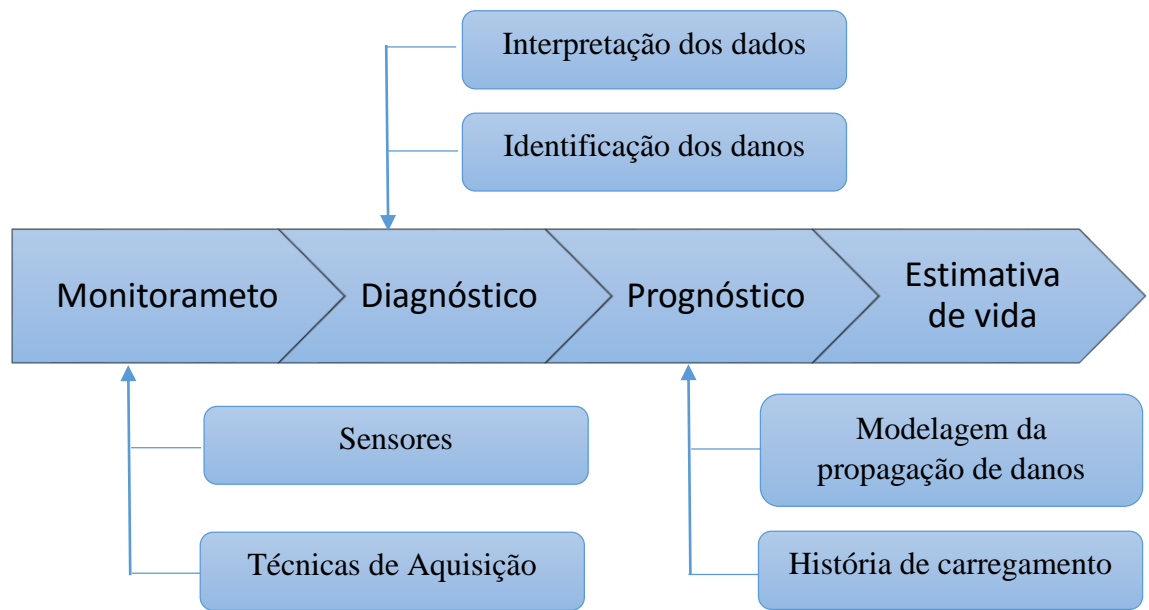


Figura 3: Funcionamento de um Sistema SHM [10].

2.1.1 Fase de Monitoramento

A fase de monitoramento compreende a identificação de defeitos e da propagação de danos pela estrutura. Essa identificação ocorre através da instalação de sensores e transdutores capazes de sinalizar a presença de vibrações, anomalias e alterações no estado de deformação do componente analisado. Os sensores mais utilizados nesta etapa são os piezelétricos, fibra ótica e os extensômetros elétricos.

Os sensores piezelétricos e de fibra ótica são capazes de detectar a deformação proveniente da alteração de histórico de carregamento devido a modificação da amplitude do sinal transmitido e do comprimento de onda. Esses tipos de sensores, além de realizarem um monitoramento local da estrutura, na qual estão inseridos, também monitoram o componente globalmente.

Essa abrangência global é determinada através de um correto desenho da arquitetura de posicionamento dos sensores, a fim de aloca-los em posições estratégicas para a individualização de cada possível caminho de propagação de defeitos. Portanto, é importante que a distância entre os sensores seja inferior ao comprimento crítico de propagação instável dos defeitos, desta forma deve-se realizar um estudo preliminar para compreender quais são os

tipos de danos críticos e suas características, de acordo com as solicitações a qual a estrutura estará submetida [4].

O conceito de monitoramento através de sistemas de vibração é utilizado devido as diferentes formas que os materiais podem vibrar, essa diferença também é percebida em um mesmo material com alguma anormalidade na sua estrutura, como no caso da presença de defeitos. Esse tipo de técnica pode ser dividida em:

- Ativa, ou seja, quando sensores e atuadores são colocados juntos e em estado vibratório a fim de propagar ondas vibratórias no interior das estruturas e dessa forma analisar as diferenças apresentadas na propagação do sinal proveniente dos sensores [4], [11];
- Passiva, na qual os sensores e atuadores, diferentemente ao que ocorre no caso da técnica ativa, não são as fontes que contribuem para a vibração do sistema apenas estão fixados sobre a estrutura e fazem a leitura da energia elástica acumulada durante a deformação [4], [12].

2.1.2 Fase de Diagnóstico

Esta fase corresponde àquela na qual será feita a leitura do sinal captado e, portanto, a identificação da posição do defeito e suas causas. Para que o diagnóstico possa ser feito de forma correta e eficiente é necessária a implantação de um sistema de análise de dados compatível com o tipo de sensor utilizados e sensível as diferentes formas de propagação de danos como surgimento de trincas, comportamento a fadiga e a impactos. Também é essencial a utilização de programas que transformem o sinal emitido pelos sensores nas grandezas referentes a caracterização do defeito seja através de métodos estatísticos ou simulações numéricas.

2.1.3 Fase de Prognóstico

A fase de prognóstico é responsável pela utilização das informações coletadas durante o monitoramento e levantamento da história dos carregamentos sofridos pela estrutura para estimar a vida útil do material após a presença dos danos e a necessidade de novas manutenções.

Esse tipo de estimativa já está bem consolidada entre os materiais metálicos, pois a comunidade científica mundial já possui um nível confiável de conhecimento sobre o comportamento a fadiga e a propagação de trincas nesses materiais. Porém, o mesmo conhecimento ainda é pouco pertinente quando se trata de materiais compósitos, fator esse que tem influência direta no projeto de elementos constituídos desse tipo de material que, atualmente, se baseiam na hipótese que nenhum tipo de dano deve se propagar quando o elemento está sujeito as solicitações normais de carregamento o que acarreta em um superdimensionamento da estrutura e perda de eficiência do componente [9].

Apesar dessa presente incerteza do comportamento de materiais compósitos em relação a propagação de danos e seu comportamento a fadiga, é cada vez maior a sua utilização em diversos setores industriais e um deles é o aeronáutico (Figura 4).

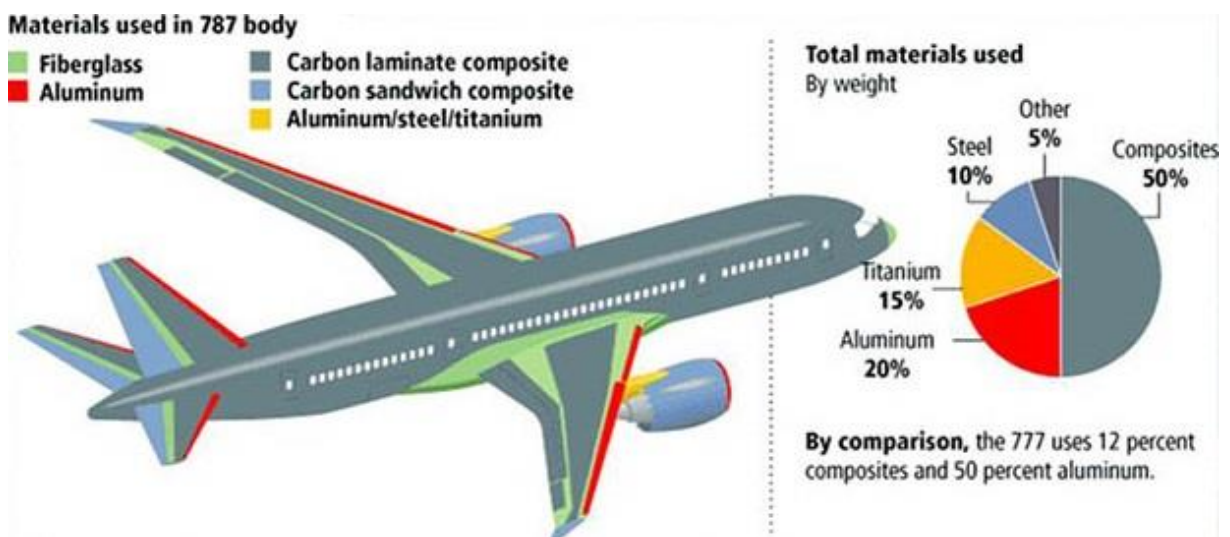


Figura 4: Utilização de Compósitos no Boeing 787 [13].

2.2 Principais Tecnologias SHM

Antes de abordar os principais tipos de tecnologias SHM é possível fazer uma pré-divisão em dois grandes grupos: os sistemas de monitoramento que trabalham *online* e estão implementados inclusive durante a vida operativa da estrutura, ou os *off-line* que apenas ocorrem durante as paradas de manutenção. As principais tecnologias empregadas no SHM serão descritas nos tópicos seguintes, conforme exemplificado em [5].

2.2.1 Acoustic-Ultrasonic (AU)

É uma tipologia de sensor piezelétrico, modalidade *off-line*, utilizado principalmente na identificação de defeitos relacionados a delaminação das fibras compósitas e a propagação de trincas. Seu funcionamento é baseado no envio de ondas acústicas através da estrutura, que caso esteja modificada, devido à presença de algum defeito, irá alterar a absorção dessas ondas pelos sensores.

2.2.2 Sensitive Coatings (SC)

Essa técnica consiste na aplicação de revestimentos, com sensores piezo ou ferro elétricos englobados, sobre a superfície de laminados, chapas metálicas presentes dentro do compósito. Também faz parte do grupo de sensores que funcionam de forma *off-line*.

2.2.3 Strain Gauges (SG)

Strain Gauges são filamentos metálicos colocados sobre o componente (Figura 5 [14]), no qual será realizada a análise de manutenção, de tal forma que seja sensível a deformações e dessa forma altere sua resistência elétrica, identificando a presença de danos. Apresentam como principal desvantagem a sensibilidade a efeitos eletromagnéticos externos que podem acarretar em alterações nos sinais elétricos emitidos.

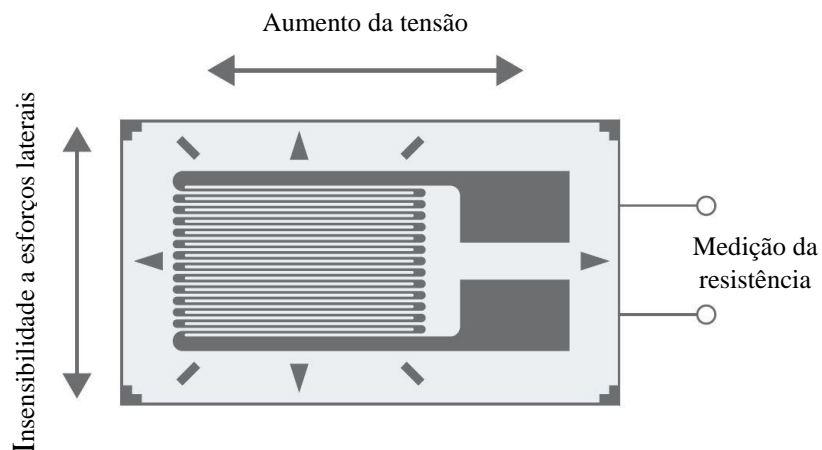


Figura 5: Strain Gauge [14].

2.2.4 *Environmental Degradation Monitoring Sensors (EDMS)*

Sensores integrados sobre a superfície, cuja modalidade de funcionamento é *online*, capazes de identificar mudanças no material no qual estão fixadas, seja identificação do grau de umidade, pH e a própria corrosão da estrutura.

2.2.5 *Microwave Sensors*

Sensores de micro-ondas é uma técnica recente e aplicada na análise de materiais compósitos, principalmente em sanduíches. O monitoramento estrutural é realizado através do controle do teor de água absorvido pelo componente que está diretamente relacionado a absorção das micro-ondas. É um sistema de atuação *off-line* e local.

2.2.6 *Comparative Vacuum Monitoring (CVM)*

É um método de monitoramento *off-line* e local, ideal para aplicação em materiais metálicos e compósitos. Baseado em um sistema de matriz polimérica no qual estão presente sensores e tubos capilares que proporcionam condições de vácuo e pressão ambiente (Figura 6 [15]). Essa variância de condições de vácuo e pressão é a responsável para que haja um levantamento do diferencial de pressão da estrutura e dessa forma o levantamento da propagação de trincas.

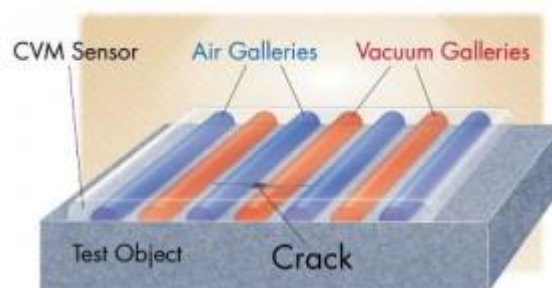


Figura 6: Sensor CVM [15].

2.2.7 Imaging Ultrasonics (IU)

Consiste na utilização de transdutores, principalmente piezelétricos, capazes de receber e transmitir ultrassons nas estruturas, nas quais estão implementados. Seu sistema de funcionamento é muito similar a análise não destrutiva de materiais, identificando a presença de trincas, defeitos superficiais e demais tipos de danos.

2.2.8 Electro-Magnetic Interference (EMI)

Funciona através do uso de sensores piezelétricos e de impedância, responsáveis pela medição da variação do campo magnético induzido na estrutura devido à presença de danos. Possui como principal limitação a aplicação apenas em materiais ferromagnéticos.

2.2.9 Fiber Bragg Gratings (FBG)

Os sensores de fibra ótica funcionam em modo *online* e são responsáveis pela análise dos mais diversos defeitos como aqueles ocasionados por impacto, identificação de casos de delaminação, propagação de trincas e análise do comportamento a fadiga da estrutura. O sistema de detecção de danos se dá através de alterações do espectro de onda emitido pelo sensor, conforme pode ser visto na Figura 7 [16].

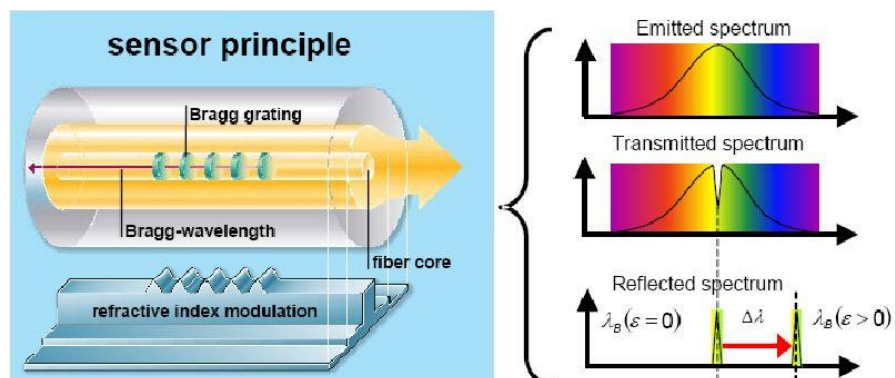


Figura 7: Sensor de Fibra Ótica [16].

Esse tipo de sensor apresenta como principais vantagens: a imunidade a interferências eletromagnéticas, ideal para aplicações aeronáuticas; elevadas bandas de transmissão, geralmente entre 850, 1300 e 1550 nm; ótima resistência a condições climáticas.

Essa técnica foi a escolhida para ser implantada no objeto de estudo deste trabalho e será melhor detalhada no capítulo subsequente.

2.3 Comparação entre Principais Tecnologias SHM

A seguir na Tabela 2 [17] estão presentes os principais tipos de monitoramento do estado de saúde de estruturas e sua performance quanto a identificação de variados tipos de danos e esforços, cujo componente está submetido.

Tabela 2: Comparação Tecnologias SHM [17].

	CVM	AU	IU	FBG	SG
Trincas	Alta Performance	-	Alta Performance	-	-
Rupturas	Alta Performance	-	Baixa Performance	-	-
Impacto	-	Alta Performance	Alta Performance	Alta Performance	-
Delaminação	-	Baixa Performance	Alta Performance	Alta Performance	-
Descolagem	-	-	Alta Performance	Alta Performance	-
Esforços Mecânicos	-	-	-	Alta Performance	Baixa Performance

Conforme observado na tabela acima, as técnicas que mais se destacam no monitoramento estrutural de componentes são a de aplicação de sensores piezelétricos capazes de emitir sinais de ultrassom (IU) e da utilização de sensores de fibra ótica, em especial àqueles com retículos de Bragg inscritos (FBG).

Capítulo 3

Sensores a Fibra Ótica

As fibras óticas são micro filamentos de material dielétrico que apresentam no seu interior pequenos espelhos denominados sensores a retículo de Bragg (FBG), os quais serão responsáveis pela reflexão dos sinais recebidos na forma de radiação luminosa em específicos comprimentos de onda [18]. A transmissão do sinal ao longo da extensão de toda a fibra ocorre devido ao fenômeno da reflexão total, no qual os índices de refração das partes mais externa e interna da fibra são modificados ocasionando uma região de descontinuidade, mantendo, assim, o sinal confinado no núcleo da mesma [3].

As camadas externas e internas supracitadas representam a estrutura desse tipo de sensor e são divididas em: *core*, que é o núcleo central no qual o sinal permanece retido; *cladding*, segundo substrato geralmente fabricado em vidro e, por fim, o *coating*, substrato de revestimento responsável pela proteção de todo o componente contra ações do tempo (Figura 8 [19]).

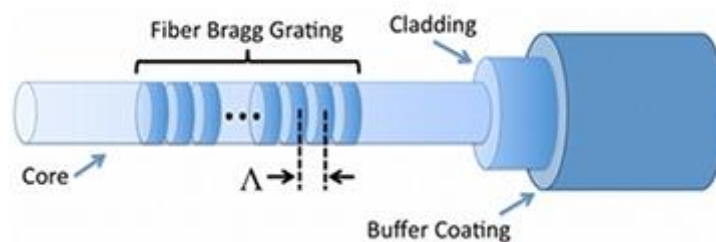


Figura 8: Camadas Fibra ótica [19].

Existem dois tipos de fibras óticas: monomodais e multimodais cuja principal diferença está na quantidade de meios de propagação horizontal dos sinais emitidos. Estas fibras apresentam, geralmente, as seguintes dimensões: *core* de no máximo 10 μm para as monomodais enquanto que as multimodais apresentam um diâmetro de 62,5 μm , somado um diâmetro de 125 μm de *cladding*. Logo após, há a presença do revestimento que pode agregar desde 7 μm de diâmetro de poliamida a 75 μm de poliacrilato [10].

Porém, atualmente, foi desenvolvida uma nova geração de fibras com revestimento cerâmico (Ormocer®) que apresenta diâmetro de 80 μm , do *core* ao *cladding*.

3.1 Teoria Envolvida nas Fibras Óticas

Conforme foi citado na seção anterior, as fibras óticas possuem o seu funcionamento baseado na reflexão total interna (TIR) que define a passagem dos raios luminosos sem a alteração de módulo ou direção devido à presença de meios cujo índice de refração é diferente, esse fenômeno pode ser representado pela Lei de Snell conforme a Equação 1.

$$n_1 * \text{sen}\theta_1 = n_2 * \text{sen}\theta_2 \quad (1)$$

Em que:

n - representa o índice de refração do meio, no qual está presente;

θ - ângulo formado entre a reta normal a superfície de incidência e os raios luminosos, conforme Figura 9 [3].

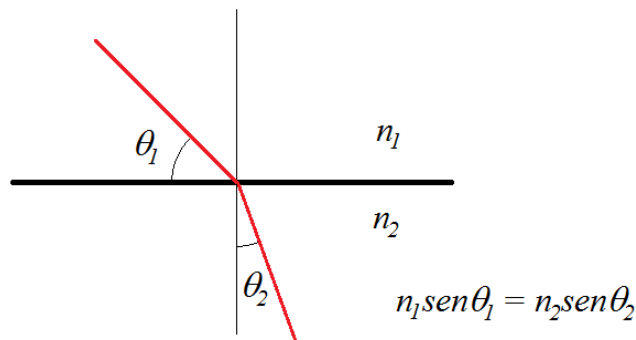


Figura 9: Representação da Lei de Snell [3].

Para que seja possível a reflexão total nos sensores de fibra ótica é necessária que a diferença dos índices de refração entre *core* e *cladding* seja suficiente para gerar um ângulo de entrada crítico θ_{1c} , θ_2 seja igual a 90° e por consequência seu seno igual a 1.

A região representada pelas linhas de entrada e saída do raio luminoso, ou seja, região na qual os ângulos garantem a completa reflexão, é denominada como cone de aceitação da fibra (Figuras 10 (a) e (b)).

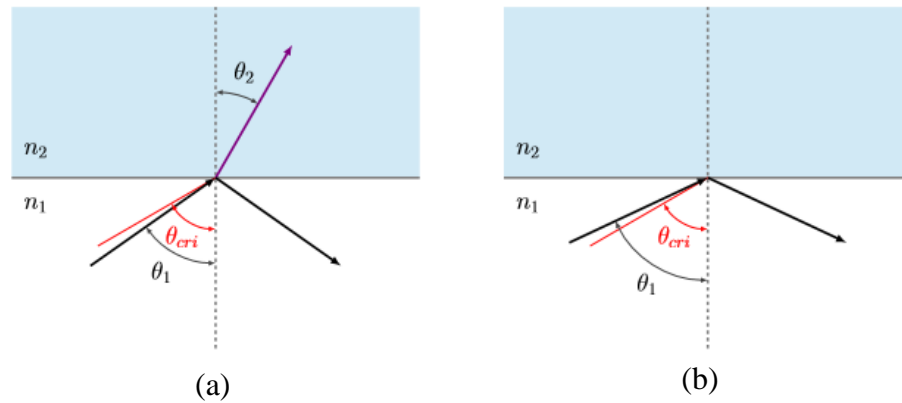


Figura 10: (a) Refração e (b) Reflexão completa [17].

Um parâmetro muito importante na seleção de fibras óticas é a sua abertura numérica (NA) que é o produto do índice de refração do meio pelo seno do ângulo máximo de abertura ($\theta_{máx.}$) do cone de aceitação, conforme a Equação 2.

$$NA = n_1 * \text{sen}\theta_{máx.} \quad (2)$$

Vale a pena ressaltar que para evitar a perda de sinal, ou a redução da sua intensidade não se deve produzir curvas nas fibras durante sua manipulação e fixação.

3.2 Retículo de Bragg

São sensores presentes no interior do *core*, capazes de identificar e medir grandezas como temperatura e deformação através das alterações nas características do espectro luminoso, em especial o seu comprimento de onda, que por eles são refletidos. Os Retículos de Bragg funcionam como filtros óticos em transmissão, através dos quais ocorre a passagem da luz, enquanto que alguns feixes são refletidos [4]. A reflexão pode acontecer de forma construtiva, ou seja, quando as componentes luminosas se somam até a formação de um pico, localizado no centro do comprimento de onda; ou destrutiva, quando as componentes vão se anulando. Para a interação construtiva dos raios luminosos é necessária que a condição de Bragg seja atendida, conforme a Equação 3.

$$\lambda_B = 2 * \eta_{eff} * \Lambda \quad (3)$$

Sendo:

λ_B – comprimento de onda central do espectro luminoso;

η_{eff} – índice de refração eficaz do retículo;

Λ – espaço entre os planos dielétricos do retículo.

A fim de facilitar a compreensão do funcionamento dos sensores de fibra ótica com Retículo de Bragg pode ser visualizado o esquema da Figura 11 [20].

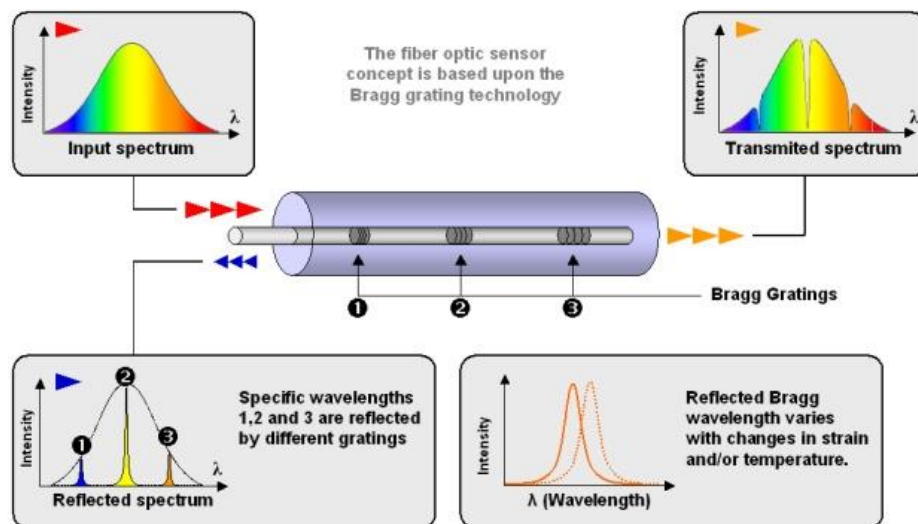


Figura 11: Funcionamento Retículo de Bragg [20].

É importante salientar que a partir da variação do comprimento de onda refletido (λ_B) é possível determinar o valor das grandezas estudadas, logo após as devidas conversões. Dessa forma, se o sensor está sujeito a deformações mecânicas ocorrerá um afastamento em direção a comprimentos maiores, em casos de solicitações a tração e a menores em situações de compressão. Já quando as solicitações são referentes a variação de temperatura, desenvolve-se uma dilatação do sensor e conseqüente alteração no índice de refração do retículo e, assim como o ocorrido em solicitações a tração, o gráfico se direciona a região de maior comprimento de onda [4].

Outro fator relevante na aquisição de dados através dos FBG é a intensidade do sinal emitido, a qual é influenciada pelos seguintes fatores: comprimento do retículo de Bragg,

consequentemente pelo seu índice de refração; e o espaçamento entre os planos reflexivos do retículo. Referindo-se ao espaçamento entre esses planos, existem dois tipos de retículo: os uniformes e os de *Chirped* (não uniforme), conforme Figura 12 [3].

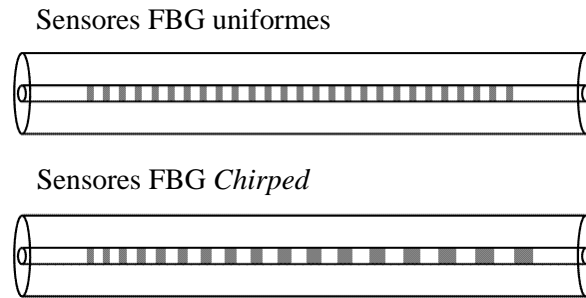


Figura 12: Tipos de sensores FBG [3].

3.3 Relação Foto-termo-elástica

Conforme supracitado, perturbações externas provocam variações nos comprimentos de onda dos sinais emitidos pelos sensores a fibra ótica. E para quantificar a influência dos diferentes tipos de perturbações que os retículos podem sofrer foi realizada uma diferenciação da Equação 3, que pode ser visualizada nos passos seguintes como o apresentado em [3] e [10].

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \frac{\Delta\Lambda}{\Lambda} + \frac{\Delta\eta_{eff}}{\eta_{eff}} = \varepsilon_1 + \frac{\Delta\eta_{eff}}{\eta_{eff}} \quad (4)$$

Em que:

$\Delta\eta_{eff}$ – variação do índice de refração efetivo;

$\Delta\Lambda$ – variação do passo entre os planos que compõe o retículo de Bragg;

ε_1 – deformação sofrida pela fibra.

A fim de facilitar a dependência do comprimento de onda (λ_B) em cada tipo de sollicitação, em especial as mecânicas e térmica, reescreve-se a Equação 4 da seguinte forma:

$$\Delta\lambda_B = \Delta\lambda_B^\Lambda + \Delta\lambda_B^T + \Delta\lambda_B^\sigma \quad (5)$$

Na qual $\Delta\lambda_B^\Lambda$ simboliza a variação do passo no retículo e pode ser representado conforme a Equação 6.

$$\Delta\lambda_B^\Lambda = \lambda_B * \varepsilon_1 = \lambda_B * (\varepsilon_1^T + \varepsilon_1^\sigma) = \lambda_B * (\alpha * \Delta T + \varepsilon_1^\sigma) \quad (6)$$

Em que ε_1^T e ε_1^σ indicam, respectivamente, a parcela de deformação axial ocasionada pelas solicitações térmicas e mecânicas, já a incógnita α representa o coeficiente de dilatação térmica do *core*.

A variação do coeficiente de refração pode ser calculada através da Equação 7.

$$\Delta\eta_{eff} = -\frac{\eta_{eff}^3}{2} \left[p_{12} * \varepsilon_1 + (p_{11} + p_{12}) * \varepsilon_2 - \left(\frac{2}{\eta_{eff}^3} \frac{d\eta}{dT} \right) \Delta T \right] \quad (7)$$

Sendo:

p_{11} e p_{12} – coeficientes de Pockel, ou seja, do tensor ótico-elástico;

ε_2 – deformação radial do sensor.

Logo, as parcelas referentes aos esforços térmico e mecânico podem ser reescritas de acordo com as Equações 8 e 9.

$$\Delta\lambda_B^T = \lambda_B \left(\frac{1}{\eta_{eff}} \frac{d\eta}{dT} \right) \Delta T \quad (8)$$

$$\Delta\lambda_B^\sigma = -\lambda_B \frac{\eta_{eff}^2}{2} [p_{12} * \varepsilon_1 + (p_{11} + p_{12}) * \varepsilon_2] \quad (9)$$

Dessa forma, a expressão completa para o cálculo da variação do comprimento de onda está representada abaixo:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B \left\{ \varepsilon_1 - \frac{\eta_{eff}^2}{2} [p_{12} * \varepsilon_1 + (p_{11} + p_{12}) * \varepsilon_2] + \lambda_B \left(\alpha + \frac{1}{\eta_{eff}} \frac{d\eta}{dT} \right) \Delta T \right\} \quad (10)$$

As constantes foto elástica e termo ótica estão representadas nas Equações 11 e 12, respectivamente.

$$P_e = \frac{\eta_{eff}^2}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \quad (11)$$

$$\zeta = \frac{1}{\eta_{eff}} \frac{d\eta}{dT} \quad (12)$$

Substituindo as constantes acima na Equação 10 obtém-se:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - p_e)\varepsilon_1 + \lambda_B(\alpha + \zeta)\Delta T \quad (13)$$

A Equação 13 pode ser apresentada de forma ainda mais compacta, conforme a equação abaixo:

$$\Delta\lambda_B = K_e * \varepsilon_1 + K_T * \Delta T \quad (14)$$

Na qual:

K_e e K_T – Constantes de proporcionalidade características do sensor.

Conforme evidenciado na Equação 14, torna-se de extrema importância desenvolver técnicas de desacoplamento dos efeitos térmicos e mecânicos emitidos pelo sensor. Dentre as existentes, optou-se por otimizar a técnica do tubo capilar na extremidade desenvolvida por Tessadori na sua dissertação de mestrado e que será elucidada na próxima seção.

3.4 Sistema de Isolamento Mecânico Através de Tubo Capilar Não Passante

Para que se possa fazer a separação dos efeitos térmicos e mecânicos nos sinais emitidos pelas fibras óticas, em geral, faz-se uso de pelo menos dois sensores FBG inscritos. Estes sensores podem estar presentes em fibras com características diferentes ou em uma única fibra com alguma técnica capaz de isola-los.

É importante observar que o fato desta técnica ser baseada no englobamento de um tubo metálico, este será o principal fator contribuinte para a invasividade do sistema. Portanto, deve-se utilizar o menor diâmetro possível do mesmo.

O sistema de isolamento mecânico através de tubo capilar não passante consiste na aplicação de um tubo metálico, fechado nas extremidades com resina epoxídica, que fará a proteção de um FBG contra os efeitos de deformação (Figura 13 [3]).

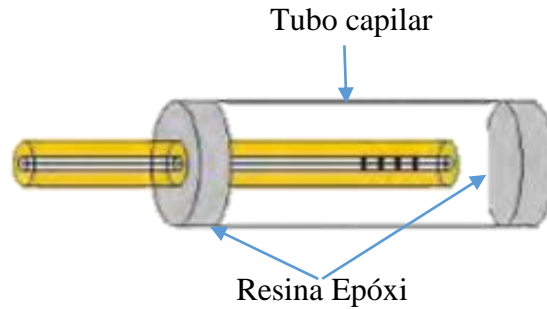


Figura 13: Sistema de Isolamento [3].

Dessa forma o sensor isolado só emitirá sinais relacionados a variação de temperatura ($K_{\varepsilon 2} = 0$) que poderão ser relacionados com os sinais referentes as solicitações térmicas e mecânicas emitidas pelo segundo detector, conforme a Equação 15, para a determinação da deformação estrutural do componente monitorado.

$$\begin{Bmatrix} \Delta\lambda_{B1} \\ \Delta\lambda_{B2} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{\varepsilon 1} & K_{T1} \\ K_{\varepsilon 2} & K_{T2} \end{bmatrix} * \begin{Bmatrix} \varepsilon \\ \Delta T \end{Bmatrix} \quad (15)$$

Sabendo os valores dos coeficientes de proporcionalidade dos sensores (K_{T1} e K_{T2}) é possível reescrever o sistema acima de forma a calcular a variação de temperatura e a deformação mecânica (Equações 16 e 17, respectivamente).

$$\Delta T = \frac{1}{K_{T2}} * \Delta\lambda_2 \quad (16)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{K_{\varepsilon 1}} \left(\Delta\lambda_1 - \frac{K_{T1}}{K_{T2}} * \Delta\lambda_2 \right) \quad (17)$$

Conseguindo assim, determinar o comportamento do material no qual esses sensores estão englobados, de tal modo que seja possível mapear as variações de deformação e de temperatura do sistema em operação e prever possíveis danos.

3.5 Englobamento de Fibras Óticas

A inclusão de elementos frágeis e de dimensões reduzidas como fibras óticas em materiais compósitos é uma operação delicada e deve garantir uma excelente adesão entre as interfaces do revestimento presente no FBG e do compósito, de modo a permitir a transferência

de todos os esforços sofridos pelo componente ao sensor, aumentando, assim, a eficiência do sistema de monitoramento.

Um dos fatores fundamentais para se garantir materiais compósitos com as propriedades mecânicas desejadas e evitar-se problemas de distorção ou perda dos sinais emitidos pelos sensores inscritos é a sequência de laminação das fibras de reforço. A disposição das fibras de reforço que melhor se adaptam a presença de elementos englobados é a unidirecional, devido a pressão gerada durante o ciclo de cura que garante uma melhor acomodação entre as fibras do compósito e da fibra ótica [3] , [17]. A laminação de fibras no mesmo sentido que os captadores FBG reduz a formação de bolsas de resina provocadas por espaços vazios provocados pelo desalinhamento das fibras de reforço.

Para a manufatura desse tipo de componente existem duas técnicas de englobamento que serão descritas nos tópicos abaixo [17].

3.5.1 Englobamento Através de *Quick-Pack*

Quick-Pack é um sub-laminado, fabricado, geralmente, de finas camadas de fibra de vidro em forma de tecido, cuja espessura é igual a 0,05mm e possui um alto grau de impregnação, ou seja, acima de 50% do seu conteúdo é composto de resina. Este sub-laminado funciona como um pacote projetado para proteger o material que será englobado e tem como principal vantagem a sua liberdade de implementação quanto à disposição das fibras de reforço, pois mantém o material retilíneo.

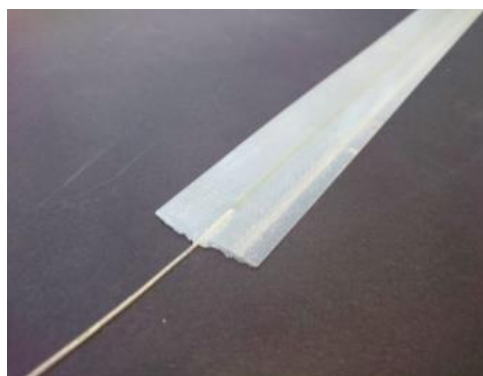


Figura 14: Exemplo de *Quick-Pack* [17].

3.5.2 Englobamento Direto

Embora o *Quick-Pack* possua espessuras reduzidas e facilite o englobamento de materiais frágeis, este modifica a sequência de laminação nos materiais compósitos, devido a sua espessura, que podem variar as propriedades mecânicas do produto final. Além da possível incompatibilidade de propriedades térmicas e mecânicas, caso sejam utilizadas fibras de reforço de um material diferente daquele presente no *quick-pack*.

Nestes casos, não se deve fazer o uso deste pacote de proteção bastando, apenas, o englobamento direto da fibra ótica seguido de pelo menos uma camada orientada de maneira unidirecional [6]. O ideal nestes casos é que a fibra ótica tenha uma alta abertura numérica, pois garante uma menor perda de sinais.

Capítulo 4

Tecnologia Desenvolvida para a Identificação e Proteção de Sensores de Fibra Ótica

Neste capítulo serão descritos os principais testes e processos desenvolvidos para a manipulação dos sensores de fibra ótica e o englobamento destes nos materiais compósitos. Vale ressaltar, que este trabalho e os dados apresentados nos próximos capítulos foram realizados em conjunto com os mestrandos Patrick Bogotto e Daniele Rocca do Departamento de Estruturas Aeroespaciais do Politecnico di Milano, durante intercâmbio pelo programa Ciências Sem Fronteiras no período acadêmico de 2014/2015.

4.1 Identificação do Posicionamento do Sensor FBG na Fibra Ótica

Conforme evidenciado nas seções 3.3 e 3.4, sistemas de monitoramento baseados na utilização de sensores de fibra ótica necessitam de uma técnica de desacoplamento dos sinais térmicos e mecânicos emitidos. A técnica selecionada foi a de isolamento mecânico de um sensor FBG através da utilização de tubos capilares.

Os sensores de fibra ótica comercializados possuem uma marcação identificando a região de localização do sensor, e em geral essa marcação possui um comprimento de 30 a 50 mm, comparada ao comprimento dos sensores que é cerca de 10 vezes menor.

O comprimento da marcação não seria um problema se apenas a fibra ótica, cujos diâmetros variam na escala de 200 μ m, fossem inseridas no laminado, porém, para tornar-se possível o sistema de monitoramento é necessário o uso de tubos capilares para proteger e separar um dos sensores englobados.

Dessa forma, torna-se interessante o conhecimento da exata posição do sensor de tal forma que se possa fazer uso do tubo capilar com as menores dimensões possíveis. Portanto, foi desenvolvido um método de identificação dos sensores através da fixação de um sensor starter e do estímulo de acionamento dos demais sensores através da aproximação de uma fonte de calor, conforme o esquema da Figura 15.



Figura 15: Esquemática do Teste pela Aproximação da Fonte Térmica.

Para realizar o teste de identificação dos sensores utilizou-se (Figura 16):

- Máquina de corte a fio quente, como fonte térmica a velocidade de avanço constante;
- Placa de alumínio para fixação das fibras óticas;
- 4 fibras óticas com revestimentos diferentes para comparar a aplicação da técnica aos *coatings* de poliacrilato, poliamida e ormocerâmica. Dentre as fibras, 3 foram analisadas e uma serviu como starter do processo;
- Interrogador ótico *Micron Optics*;
- Computador para aquisição dos dados.

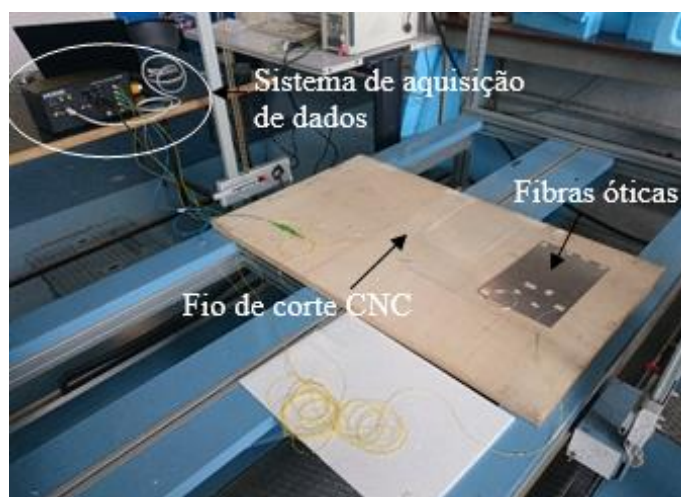


Figura 16: Metodologia para identificação dos sensores FBG.

4.1.1 Procedimentos Utilizados

Os testes para identificação do posicionamento do centro dos sensores FBG na fibra ótica foram realizados através dos procedimentos descritos nas seções seguintes.

4.1.1.1 Posicionamento das Fibras Óticas Durante o Teste

As fibras óticas investigadas foram posicionadas em uma direção perpendicular à do fio quente, de modo que se tenha uma propagação de calor uniforme em cada ponto da fibra. Na medida em que o sensor utilizado como starter foi posicionado paralelamente a fonte de calor para ter um acionamento mais sensível e instantâneo, com o objetivo de cumprir sua missão de marcar o início da passagem da fonte de calor pelos demais sensores FBG de forma eficiente (Figura 17).

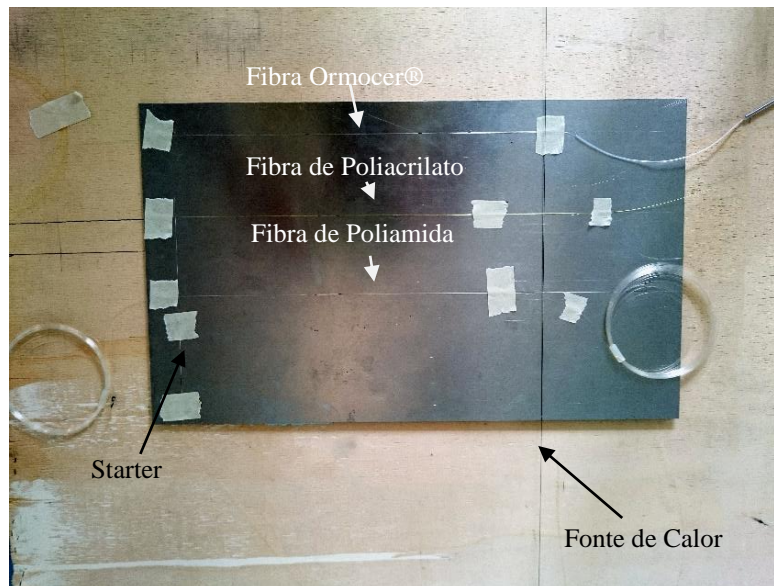


Figura 17: Disposição das Fibras Óticas sobre Chapa de Alumínio.

4.1.1.2 Paralelismo Entre a Chapa de Alumínio e a Fonte Térmica

A garantia do paralelismo entre a chapa e fio quente foi de fundamental importância para que a propagação do calor ocorresse de forma uniforme por todo o comprimento da fibra ótica evitando perdas de sinais.

4.1.1.3 Definição dos Parâmetros de Teste

Foram determinados parâmetros como: a altura entre a fonte de calor e os sensores, necessidade de elevação dos sensores em relação ao suporte, velocidade de propagação da fonte de calor e a potência térmica do fio quente; todos descritos nos tópicos abaixo.

4.1.1.3.1 Variação do Comprimento de Onda do Sensor *Starter*

O sensor FBG utilizado como starter, teve como principal função monitorar o início do escaneamento do fio quente sobre as demais fibras óticas a fim de obter-se um histórico temporal da operação. Esse registro foi feito através da variação de temperatura do *starter*, provocando um deslocamento do seu pico de Bragg (λ_B) utilizado como sistema de acionamento para o interrogador ótico, operação executada com maior precisão em comparação ao acionamento manual.

A variação do tempo durante a operação de escaneamento foi utilizada para a determinação do posicionamento do centro do detector FBG, a partir da sua multiplicação pela velocidade de movimentação do fio quente. Portanto, é de fundamental importância que este acionamento seja feito com menor diferença de tempo entre o mesmo e a passagem da fonte de calor sobre o centro do sensor. Para esse motivo, foi realizado um estudo das melhores condições de acionamento determinando-se uma variação de comprimento de onda ($\Delta\lambda = 2\text{nm}$), relacionado a uma variação de temperatura de 2°C , para dar início a captação dos sinais pelo interrogador ótico.

4.1.1.3.2 Altura entre a Chapa de Alumínio e os Sensores de Fibra Ótica

A altura entre a chapa de alumínio e os sensores de fibra ótica influenciam diretamente na transmissão de calor entre o fio aquecido e os sensores FBG, por conseguinte foram realizados dois tipos de testes: o primeiro com as fibras apoiadas sobre a chapa de alumínio e o segundo com uma altura de 1mm entre os componentes.

Após a realização dos testes, observou-se um aumento da amplitude de onda dos sensores elevados a 1mm da chapa, demonstrando de forma mais clara o pico de Bragg (λ_B) e por consequência o posicionamento do sensor (gráficos apresentados no Capítulo 6).

Esse comportamento ocorre devido ao fato da irradiação ser a forma de propagação de calor de maior influência sobre esse sistema, uma vez que o contributo da convecção não é relevante devido à velocidade de avanço da fonte de calor e o pouco tempo de permanência desta sobre um determinado ponto do comprimento da fibra ótica, ocasionando um aquecimento desprezível do ar circundante.

Outro fator a ser considerado é a boa condutibilidade térmica do alumínio, que ao momento em que a fibra está apoiada sobre o mesmo gera-se uma diferença de temperatura entre a parte do sensor em contato com a chapa e aquela exposta ao ar.

Portanto, utilizou-se uma altura de 1mm entre as fibras óticas e o suporte de alumínio.

4.1.1.3.3 Altura da Fonte de Calor

Este é um fator fundamental para a propagação de calor, uma vez que a potência da fonte de calor (Q) está inversamente ligada ao quadrado da distância de aplicação da fonte de calor (h), conforme a Equação 18.

$$Q \propto \frac{1}{h^2} \quad (18)$$

Distâncias muito pequenas da fonte de calor podem ocasionar defeitos no revestimento das fibras e até mesmo sua ruptura, enquanto que distâncias muito elevadas geram uma pequena

potência térmica resultando em defasagem no deslocamento do comprimento de onda e redução da sua amplitude, dificultando assim a determinação do posicionamento do sensor.

A altura selecionada foi de 2mm.

4.1.1.3.4 Aquecimento Percentual do Fio Quente e Velocidade de Avanço

Estes parâmetros estão relacionados a quantidade de troca de calor em uma determinada região da fibra ótica por unidade de tempo, que sucessivamente será utilizado na determinação do posicionamento do sensor. Para a seleção destes parâmetros foram realizados testes experimentais variando a velocidade de avanço (V_{scan}) entre 4 a 16mm/s e um percentual térmico entre 70 a 90%.

4.1.1.4 Execução dos Ensaios

Após a definição de todos os itens e a esquematização do *layout* do experimento (Figura 18) foram realizadas 8 replicatas, dentre estas 4 no sentido chamado de ida e os outros 4 no sentido contrário, denominado como retorno. Os gráficos e resultados obtidos serão comentados no capítulo 6.

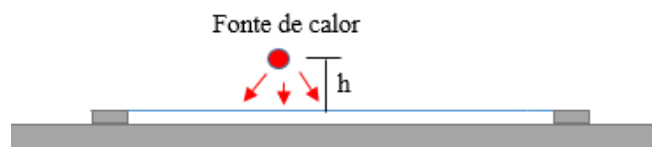


Figura 18: Esquema de Execução dos Testes.

4.2 Sistema de Proteção da F.O. Durante a Laminação

Como já foi mencionado nas seções anteriores uma das grandes dificuldades na aplicação do SHM encontra-se no englobamento dos sensores nas estruturas, e não foi diferente na elaboração deste projeto. Desta forma, desenvolveu-se uma técnica para o correto isolamento do sensor que será utilizado no desacoplamento térmico dos sinais emitidos pelos sensores FBG

e um sistema de proteção da fibra ótica a ser utilizado durante o processo de fabricação do laminado, de modo a evitar o rompimento das fibras ou a passagem de resina pelos tubos “guias” dos sensores na saída do compósito.

4.2.1 Preparação dos Sensores para Englobamento

A primeira atividade a ser realizada na implementação de sistemas de monitoramento baseados na técnica de desacoplamento de sinais está no isolamento do sensor que somente estará sujeito aos efeitos térmicos.

Para a preparação do sensor isolado, optou-se pela utilização de um tubo capilar metálico de diâmetro reduzido, porém não com diâmetro diferente da fibra inscrita para evitar que esta sofra solicitações mecânicas. A título de teste foi selecionada uma fibra ótica de diâmetro de $115\mu\text{m}$, comprimento do sensor FBG de 8mm, o que determinou o uso de um tubo capilar com as seguintes dimensões: diâmetro externo equivalente a $450\mu\text{m}$; diâmetro interno de $180\mu\text{m}$ e um comprimento de pelo menos 15mm, objetivando alcançar espaço suficiente para vedar as suas extremidades sem que o adesivo entre em contato com a região na qual o sensor está presente.

Os procedimentos para a preparação dos tubos capilares estão descritos abaixo:

- **Corte:** O corte é realizado através da utilização de uma micro retifica, Dremel, e deve ser feito considerando dimensões superiores às desejadas, devido ao seu acabamento superficial de baixa qualidade na região do corte (Figura 19).

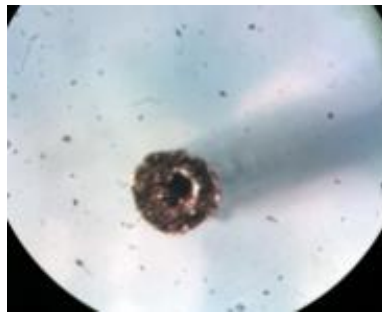


Figura 19: Tubo Capilar Após o Corte.

- **Lixamento da Superfície:** Após o corte, a superfície do tubo capilar fica repleta de rebarbas que devem ser eliminadas através da operação de lixamento, seguido de um jato de ar comprimido, para evitar que as mesmas venham a romper a fibra ótica (Figura 20). O lixamento também deve ser realizado em toda a superfície lateral do tubo, a fim de melhorar a sua aderência quando o mesmo entrar em contato com os materiais compósitos.

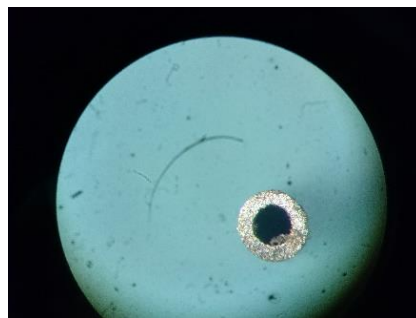


Figura 20: Tubo Capilar Após Lixamento.

- **Vedação das Extremidades:** Após a preparação do tubo capilar, deve-se vedar um dos lados com um adesivo epoxídico, logo depois da sua cura, insere-se a fibra ótica no tubo que terá sua outra extremidade fechada pelo mesmo adesivo (Figura 21). Observa-se nesta fase uma apurada atenção durante esta operação para evitar que a região na qual o sensor está presente entre em contato com a cola.

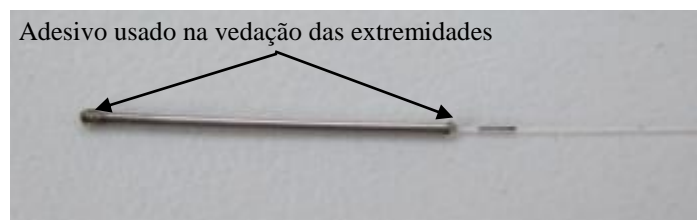


Figura 21: Sensor Isolado para Desacoplamento Térmico.

4.2.2 Proteção da Saída da Fibra Ótica

Um outro fator que confere criticidade no englobamento de fibras óticas está na saída da mesma da interface do compósito que deve ser bem projetada para evitar problemas como a ruptura da fibra devido a zona de descontinuidade ao final do laminado, inatividade da fibra ótica em decorrência do acúmulo de resina ou defeitos presentes na estrutura do material compósito.

Uma solução eficaz para a proteção das fibras óticas é a utilização de tubos guias de PEEK ou PTFE, polímeros termoplásticos (Figura 22), nos quais os sensores serão inseridos e selados com cola de secagem rápida antes da laminação, a fim de evitar a passagem por capilaridade da resina, presente na matriz do material compósito. É importante que estes tubos sejam inseridos pelo menos 10mm entre os tecidos do laminado, dado adquirido empiricamente, para garantir a sua completa adesão a matriz e evitar que os mesmos atuem como concentradores de tensão.

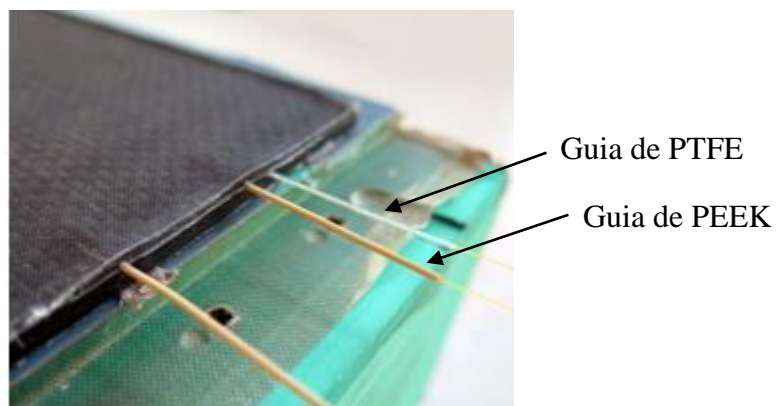


Figura 22: Utilização de Guias de PEEK para Proteção de Fibras Óticas.

Para a aplicação desejada, o sistema de produção requer a utilização de um molde fechado, alta qualidade no acabamento superficial e a reprodução da tecnologia para produção em escala industrial, não sendo possível apenas com a aplicação das guias de PEEK.

A fim de possibilitar essa proteção foi projetado um molde (Figura 23) para a fabricação do laminado, no qual fossem fixados insertos metálicos bipartidos, que funcionariam como um *by-pass*, com uma película de borracha branca siliconada de forma a evitar grandes esforços

sobre uma determinada parte da fibra; e que o silicone, devido ao seu módulo de elasticidade, possa ocupar todos os espaços vazios entre o metal e a fibra impedindo que a resina chegue a caixa de proteção dos sensores.

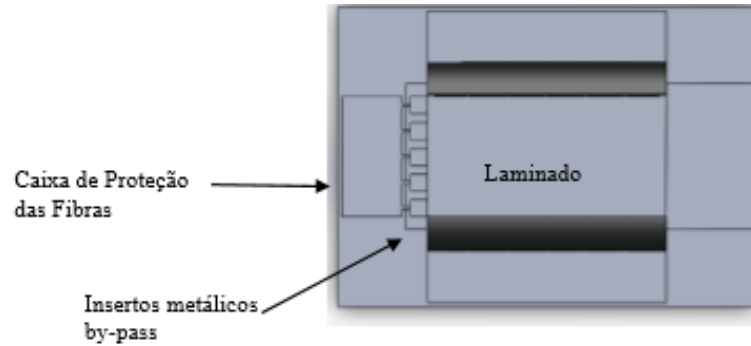


Figura 23: Esquema do Molde de Proteção da Fibra Ótica.

4.2.2.1 Inseto Metálico para *By-Pass*

Primeiramente foi projetado um inserto, para teste, de geometria bi cônica, cuja ideia principal é que seu próprio formato fosse capaz de evitar a passagem da resina para a caixa de proteção das fibras óticas, devido a diferença de pressão gerada entre os dois lados do *by-pass*; e que a área de contato do inserto com o laminado fosse a menor possível gerando um melhor acabamento superficial do compósito. Para o teste de conceito foi fabricado um inserto de ureol, poliuretano usado na fabricação de modelos, que foi utilizado para a produção da borracha siliconada no formato desejado, conforme a Figura 24.



Figura 24: *By-Pass* bi cônico.

O princípio de utilização do silicone como meio de vedação no inserto foi mantido, porém a geometria foi alterada uma vez que o formato bi cônico mostrou-se de difícil fabricação e possível causa de um aumento dos esforços sobre a fibra ótica, rompendo-a, devido a maior concentração volumétrica da borracha siliconada no centro do molde.

A geometria selecionada para a fabricação dos insertos foi a de cubos metálicos de dimensões 20x15x15 mm. A fim de garantir um bom acabamento superficial do laminado, o inserto tem uma parede metálica de modo a restringir o contato do laminado com a camada de silicone, conforme Figura 25.

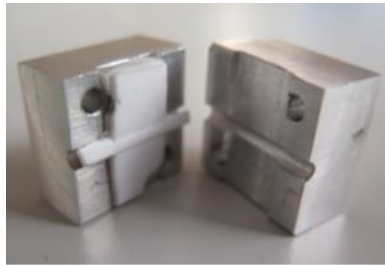


Figura 25: Insertos Metálicos Bipartidos.

Para determinar a espessura de silicone necessária realizou-se um teste para verificar a vedação do sistema, no qual o tubo guia devidamente selado com a cola de secagem rápida foi inserido no inserto metálico, este conjunto foi instalado sobre um suporte metálico, previamente furado nas mesmas dimensões do tubo PEEK utilizado. Logo após foi montado um saco a vácuo e feita a retirada de ar do mesmo. A partir da utilização de um demonstrador de pressão foi possível verificar a manutenção do vácuo no sistema de teste (Figura 26).



Figura 26: Teste de Vedação.

Foram testadas as seguintes espessuras: 0,8; 1,0; 1,3 e 1,5 mm. A que apresentou melhor resultado, e foi a escolhida como padrão, é a camada de 1mm.

4.2.2.2 Molde para Fabricação de Corpos de Prova Planos

O projeto de moldes é uma tarefa de fundamental importância quando se trata da fabricação de estruturas em materiais compósitos e na produção de corpos de prova para testes, pois garantem uma maior homogeneidade entre as peças produzidas, reduzindo a dispersão de erros referentes a fabricação, além de proporcionar uma maior produtividade.

Porém o projeto e fabricação desses tipos de moldes não é uma tarefa trivial, deve-se levar em conta o processo de manufatura dos materiais compósitos e o comportamento da matriz utilizada para, enfim, ser capaz de definir que tipo de material será usado na fabricação do molde e se há necessidade de algum tratamento superficial prévio, ao mesmo, antes do início da sua vida útil.

Com base nas considerações supracitadas, o molde projetado teve como finalidade testar o funcionamento do sistema de *by-pass* e da caixa de proteção das fibras óticas durante o processo de fabricação do laminado, além da produção de corpos de prova planos para testes estáticos. O molde possui um espaço central destinado a laminação dos corpos de prova, seguido de regiões para abrigar os insertos metálicos que conectam a região do laminado àquela chamada de caixa de proteção das fibras óticas. Nas laterais estão presentes dois recipientes para escoamento do excesso de resina durante a reticulação do laminado e duas barreiras laterais com canais para a passagem da resina, fabricadas em borracha vulcanizadas, conforme a Figura 27. As dimensões estão detalhadas nos desenhos técnicos em anexo.

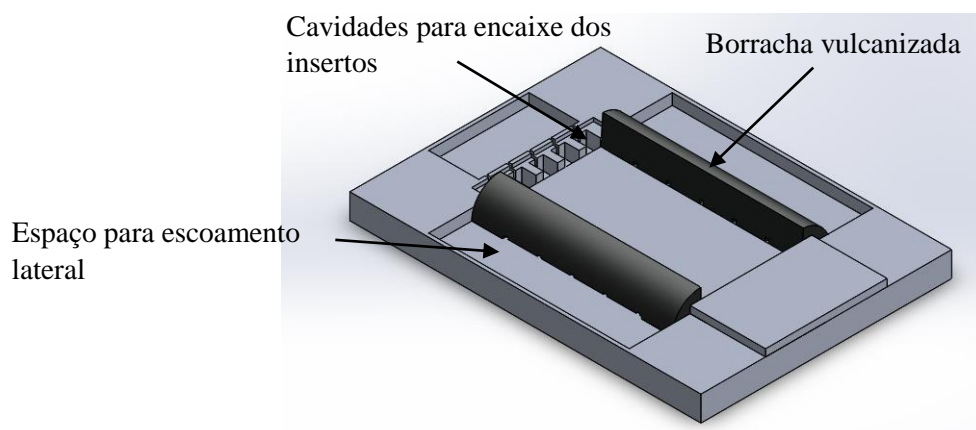


Figura 27: Projeto do Molde - *Software* utilizado Solid Works.

O material para a produção dos corpos de prova foi um tecido de fibra de vidro pré-impregnado do tipo CYCOM RIGIDITE 5216 UD² (*Cytec Industries Inc.*, Itália). Utilizou-se 8 camadas deste tecido, orientadas a 0°.

Definido o tipo de laminado a ser produzido, foi selecionado o processo de fabricação do molde e o tipo de material do mesmo: usinagem e alumínio, respectivamente.

Vale ressaltar que os moldes metálicos não podem ser utilizados logo depois da sua fabricação, é necessário que seja realizado um tratamento superficial do mesmo através de soluções químicas denominadas desmoldantes. Essa aplicação deve ser feita devido a viscosidade das resinas, ao passarem pelo processo de cura (endurecimento), principalmente quando há variação de temperatura, tendem a sofrer o fenômeno de capilaridade preenchendo os espaços vazios dos materiais nos quais entra em contato.

As soluções desmoldantes utilizadas foram o MARBOCOTE RS 415 ECO e MARCOBOTE TRE 45 ECO (*Associated Industries*, Estados Unidos). Primeiramente utilizou-se o RS 415 em toda a superfície do molde e após a secagem, esperou-se uma hora para a aplicação de 6 demãos do TRE 45, com intervalo de 30 minutos entre cada, conforme Figura 27. É importante referenciar o alto valor tóxico dessas substâncias e a necessidade do cumprimento das instruções de uso e segurança descritas pelo fabricante.



Figura 28: Estampo para Fabricação do Laminado.

Após a preparação da superfície do molde, iniciaram os testes para validar o funcionamento da técnica de *by-pass*, estes testes foram realizados através da fabricação de laminados de fibra de vidro sobre o molde, para tal utilizou-se a técnica do saco a vácuo e reticulação a baixa pressão e altas temperaturas em uma autoclave (Figura 29 [21]).



Figura 29: Autoclave do Dep. de Estruturas Aeroespaciais do Politecnico di Milano [21].

As primeiras provas apresentaram algumas dificuldades de ajustes no encaixe dos insertos metálicos e a espessura de 1,0mm do silicone aplicado como parede entre os cubos metálicos e o molde, ocasionando uma excessiva passagem de resina como apresentado na Figura 30.

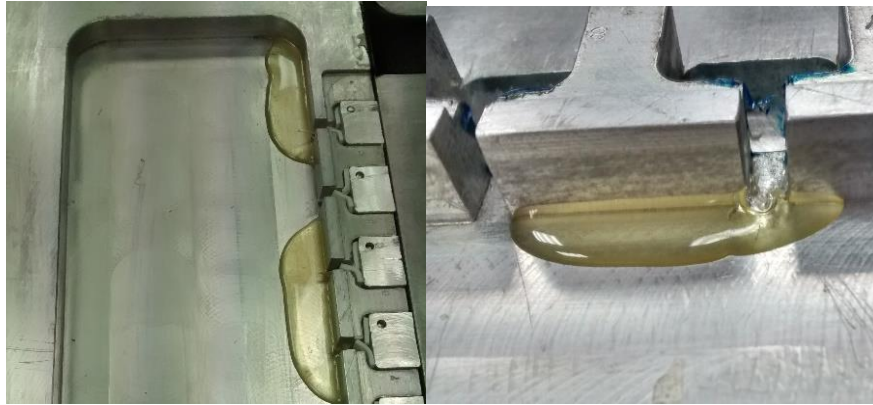


Figura 30: Saída Excessiva de Resina Através do *By-pass*.

Evidenciado este problema, adotou-se uma espessura de silicone equivalente a 1,5mm entre a parede do molde e do inserto. Os testes foram refeitos, inclusive com o englobamento de um sensor FBG no laminado, e os resultados foram satisfatórios conforme as Figuras 31 e 32.



Figura 31: Produção do Laminado.

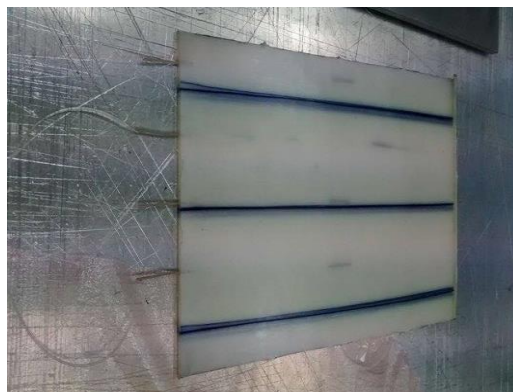


Figura 32: Laminado com SHM.

O laminado produzido teve a parte livre da fibra ótica conectada a uma fonte luminosa para verificar se ocorreu algum dano ao sensor, caso fossem evidenciadas perdas durante a propagação do sinal luminoso. Não foram constatadas irregularidades, logo a técnica de *bypass* desenvolvida foi validada.

Capítulo 5

Estudo da Adesão dos Diferentes Tipos de Fibra Ótica

Os sensores de fibra ótica podem ser fabricados com os mais diversos revestimentos (*coatings*) dentre eles: poliamida, poliacrilato e ormocerâmica. E um dos fatores importantes na escolha de qual tipo de fibra ótica fará parte do sistema de monitoramento é a adesão dos revestimentos a resina que será utilizada na matriz compósita.

Uma excelente adesão entre as fibras englobadas e o material compósito é ideal para evitar a formação de trincas ou demais defeitos na estrutura do componente, além de garantir um correto funcionamento do sensor de monitoramento, na medida em que os esforços sofridos pelo material anfitrião estão sendo totalmente repassados aos captadores FBG.

Justificando, portanto, a necessidade de um eficiente estudo da adesão entre esses componentes e uma das formas de se verificar e quantificar esse fenômeno é através do ensaio de *Pull out*, que será melhor descrito ao longo deste capítulo.

5.1 Teste de *Pull-Out*

O teste de *Pull-out* consiste no englobamento de uma única fibra em um grande volume de resina polimérica, para então ser realizado um ensaio de tração, no qual as fibras são tracionadas até a sua total extração da fibra, ou ruptura [22]. Através do registro da força e do deslocamento; e sendo conhecida as dimensões dos corpos de prova, é possível calcular a tensão interfacial entre a matriz e a fibra (TISS), que será utilizada como fator de escolha entre as fibras, conforme a Equação 19.

$$T_{iss} = \left(\frac{F_{m\acute{a}x}}{\pi * d * l_e} \right) \quad (19)$$

Em que:

F_{máx} – Força máxima registrada ao longo do teste;

d – Diâmetro da fibra;

l_e – Comprimento da fibra inserido no cubo de resina.

O comportamento da tensão de cisalhamento entre as interfaces, durante o teste de *Pull-out*, apresenta um comportamento não linear e restrito a uma pequena área, porém, ainda assim, a Equação 19 apresenta uma boa estimativa para o cálculo da mesma. Momentos antes da realização do teste, a tensão máxima interfacial encontra-se na região de descontinuidade geométrica do corpo de prova, ou seja, logo na saída da fibra ótica do bloco de resina, enquanto que ao iniciar-se o teste e com o sucessivo aumento das forças axiais a fibra, a resina começa a se comportar plasticamente até o surgimento de uma trinca que desloca o ponto de maior tensão interfacial até leva-la a completa extração da fibra [22] [23], conforme a Figura 33 [22].

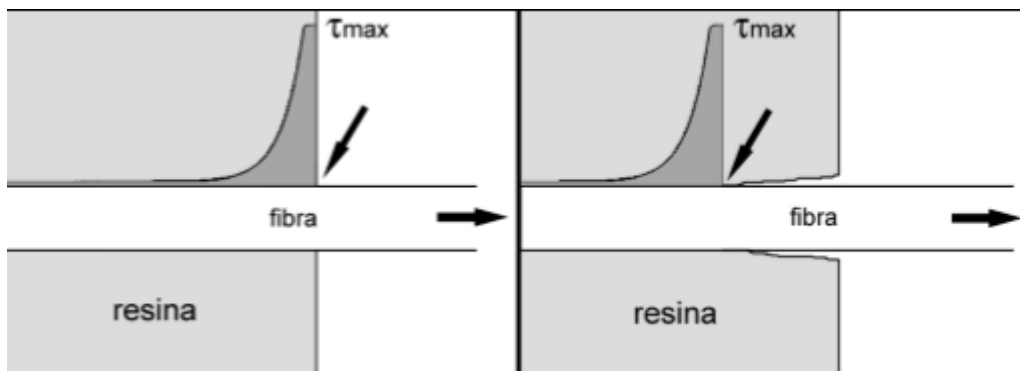


Figura 33: Tensão Máxima de Cisalhamento entre as Interfaces [22].

Outro conceito importante utilizado neste estudo de adesão foi o de comprimento crítico de englobamento (L_c), ou seja, extensão sob o qual ocorre completa extração das fibras englobadas, ocorrendo a ruptura entre as interfaces da fibra e da resina. Dimensões maiores a L_c levam a tensões máximas de cisalhamento da interface (τ_{iss}) maiores que a tensão máxima de ruptura da própria fibra (σ_{rf}) rompendo-a [22] [23].

O comprimento crítico de englobamento pode ser calculado pela Equação 20.

$$L_c = \frac{\sigma_{rf} * d}{2 * \tau_{iss}} \quad (20)$$

Na qual d representa o diâmetro da fibra na região de ruptura.

5.2 Requisitos para Execução do Teste

Para a execução de testes de *Pull-out* alguns pré-requisitos devem ser considerados como [23]:

- **Tipo de Fixação dos Copos de Prova na Máquina de Teste:** Existem duas formas de fixação dos corpos de prova nas máquinas de tração: *Restrained Top Constrain* (RTC) e *Fixed Bottom Constrain* (FBC), conforme a Figura 34 [22].

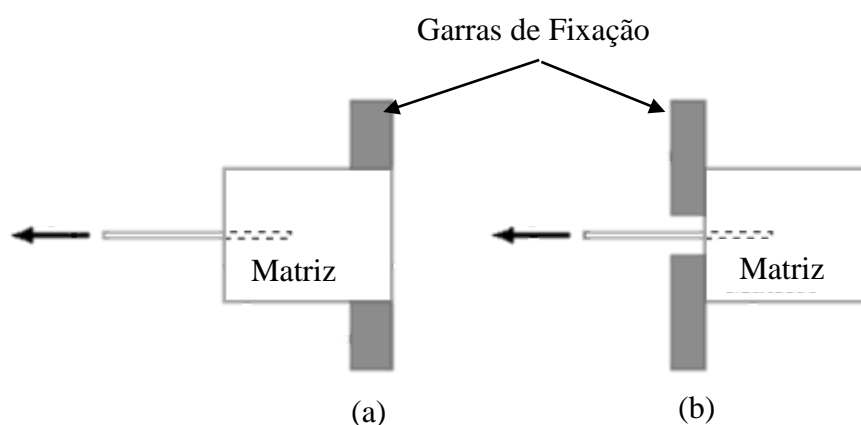


Figura 34: (a) FBC e (b) RTC [22].

A principal diferença entre os dois tipos de fixação está no comportamento das forças geradas pela garra durante o teste. No caso RTC, os esforços estão na mesma direção da fibra devido a garantia do seu alinhamento com o ponto de aplicação da força. Já na forma FBC os esforços comportam-se de maneira compressiva podendo interferir nos resultados dos testes.

- **Regularidade e Padronização dos Cubos de Resina:** Os corpos de prova devem possuir superfícies planas e ortogonais, além de terem um formato padrão para validar a comparação dos resultados entre os mesmos. Outro fator importante, é a ausência ou minimização de defeitos na resina e conseqüente redução das tensões sobre as fibras.

5.3 Molde Projetado

Devido à grande dificuldade imposta pelas dimensões da fibra ótica, pela viscosidade da resina e necessidade de um bom acabamento superficial dos blocos de matriz polimérica, de modo que evite uma elevada película deste material sobre a parte da fibra externa ao cubo, que tem a tendência de se locomover por capilaridade, não existe um sistema padrão para a produção dos corpos de prova.

Portanto, foi projetado um novo utensílio para a fabricação dessas amostras que garantisse superfícies mais uniformes e translúcidas, para facilitar nas análises, quando comparadas com àquelas das amostras fabricadas por outras técnicas, conforme a Figura 35.

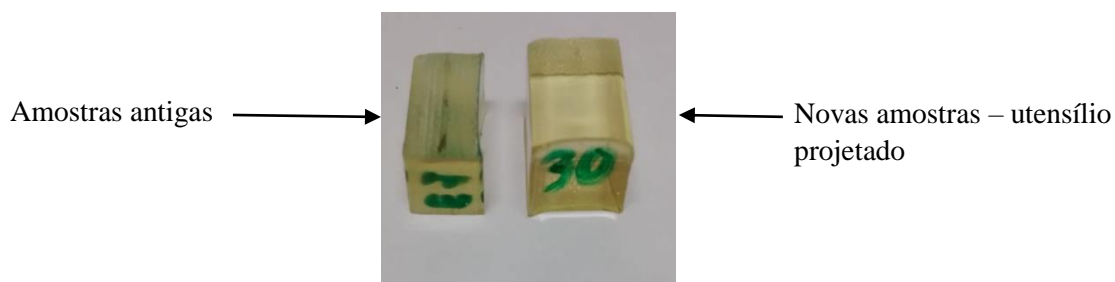


Figura 35: Blocos de Resina Para Teste de *Pull out*.

O utensílio projetado, Figura 36, trata-se de um molde metálico com o espaçamento para o depósito da resina epóxi; parte inferior para fixação das fibras óticas com regulagem de altura a fim de facilitar a alteração do comprimento englobado nas resinas; para garantir um bom acabamento superficial dos cubos de resina utilizou-se uma base de teflon com furos de 0,5 mm, cuja fixação é feita através de parafusos M5 e um suporte de alumínio; e para evitar a passagem da resina pela ação da capilaridade, agravada pela gravidade, adotou-se uma película de silicone de 1mm de espessura entre as bases de alumínio e teflon.

Os desenhos com maiores detalhes do projeto encontram-se em anexo.



Figura 36: Utensílio Para Fabricação de Corpos de Prova.

5.4 Fabricação dos Corpos de Prova

A fabricação dos corpos de prova para teste foi uma operação delicada, devido a fragilidade das fibras óticas, e desenvolveu-se a partir da sequência abaixo:

1. **Preparação da Fibra:** Esta etapa consiste no corte das fibras óticas no comprimento total de 90mm, seguido de limpeza das mesmas para evitar a contaminação da resina.
2. **Montagem das Fibras Óticas na Placa de Teflon:** A próxima etapa trata-se da passagem das fibras óticas através das placas que servirão de suporte para a mesma. Para facilitar essa operação é conveniente colocar as placas (previamente furadas) na seguinte sequência: placa metálica, película de silicone e placa de teflon. Logo após esse conjunto deve ser fixado na placa superior (com as cavidades para produção dos blocos de resina) pela utilização de parafusos M5.
3. **Determinação do Comprimento de Englobamento:** Após a fixação dos suportes da fibra ótica no molde (Figura 37), deve-se determinar os comprimentos de englobamento dos sensores para o teste, através da medição da profundidade de entrada das fibras nas cavidades de produção da resina, por meio de um escalímetro.

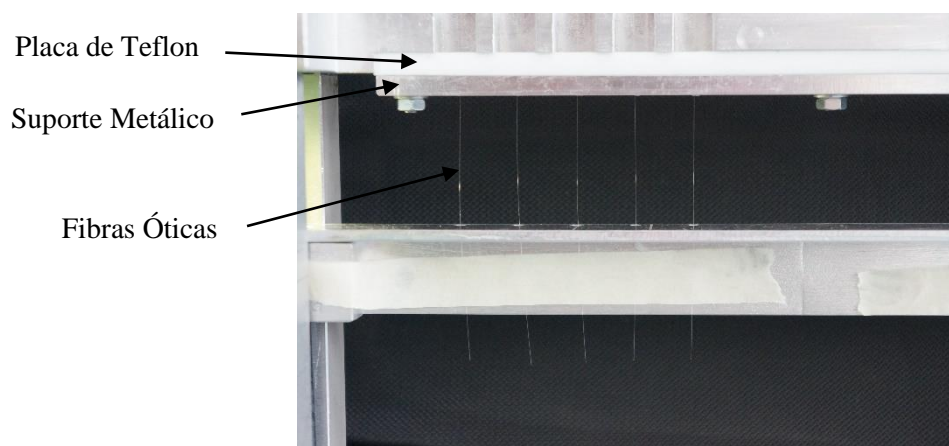


Figura 37: Fixação dos Suportes das Fibras no Molde.

4. **Fixação dos Filmes Adesivos:** Nesta fase, deve-se fechar o lado aberto da placa com a presença das cavidades, a fim de que o único acesso livre a estas seja pela parte superior do molde. É importante observar a necessidade de garantir a completa vedação da superfície lateral do molde, para evitar o vazamento da resina.
5. **Aplicação da Resina:** Aplica-se a resina, pela parte superior do molde, nas cavidades (Figura 38). Para a realização deste trabalho utilizou-se a resina do tipo epoxídica E-227 (PROCHIMA®, Inglaterra) que possui tempo total de cura de 72 horas a temperatura ambiente, ou, em caso de aquecimento da mesma a 80°C, o tempo decaiu para 5 horas.

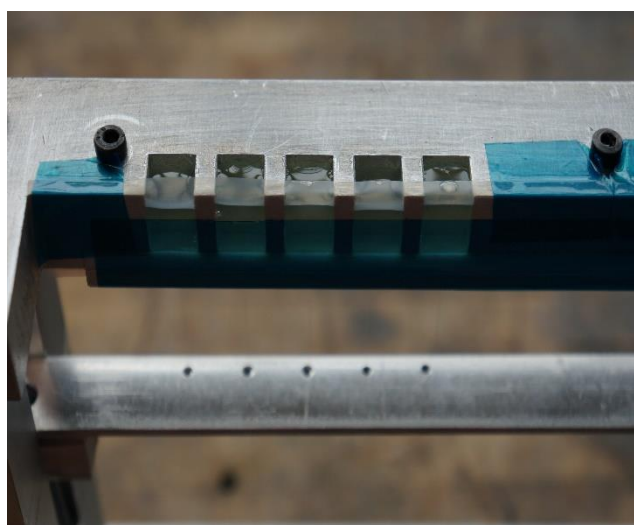


Figura 38: Detalhe da Fabricação dos Corpos de Prova.

6. **Retirada dos Corpos de Prova do Molde:** Desmontagem do utensílio e retirada cuidadosa dos blocos de resina para evitar o rompimento das fibras, obtendo como produto final corpos de prova conforme a Figura 39.

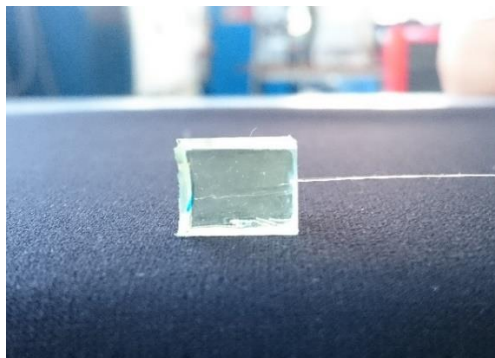


Figura 39: Corpos de Prova Após Retirada do Molde.

7. **Suporte de Fixação da Fibra Ótica na Máquina de Teste:** Devido as características dimensionais da fibra ótica é necessário a produção de um suporte a ser fixado na mesma, com a finalidade de facilitar o seu encaixe na máquina de testes. Este suporte foi feito a partir de placas de fibra de vidro (Figura 40) com a presença de uma ranhura com o objetivo de manter a ortogonalidade da fibra; a sua fixação foi realizada através da aplicação do adesivo LOCTITE Hysol® 3425 (LOCTITE – *Industrial Adhesives and Sealants*, Inglaterra) devido ao seu rápido tempo de cura e boas propriedades mecânicas tais como: elevada tenacidade e resistência a esforços de cisalhamento.



Figura 40: Placa de Fibra de Vidro utilizada como Suporte.

É importante salientar, que todos os componentes metálicos, antes da sua utilização, foram tratados com desmoldante metálico.

5.5 Tipos de Amostras

Após todo o processo de fabricação descrito na seção anterior, os corpos de prova assumiram a seguinte configuração (Figura 41):

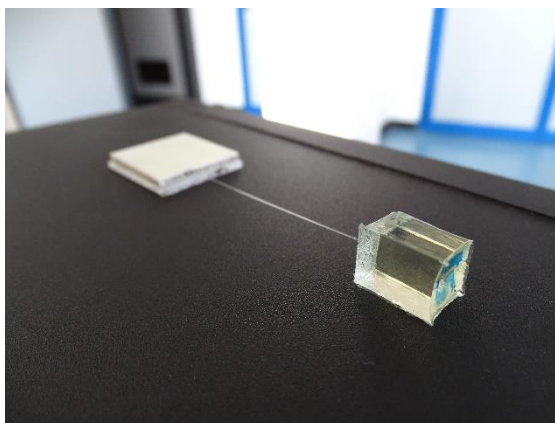


Figura 41: Corpos de Prova Para Teste de *Pull-out*.

Para a execução dos testes de *Pull-out* foram analisados 4 tipos de fibras de dimensões de *cladding* e revestimento diferentes, conforme a Tabela 3.

Tabela 3: Tipos de Amostras Analisadas.

Tipo de Revestimento	Diâmetro <i>cladding</i>	Diâmetro Revestimento
Poliacrilato	125 μm	250 μm
Poliamida	125 μm	140 μm
Ormocerâmica	125 μm	220 μm
Ormocerâmica	80 μm	115 μm

5.6 Execução dos Testes

Para a realização dos testes de *Pull out* foi necessária a fabricação de uma garra específica para prender os blocos de resina e um suporte para fixação da fibra ótica, ambos foram feitos a partir de tecidos de fibra de vidro pré impregnada.

O tipo de garra escolhido para a execução do teste é *Restrained Top Constrain (RTC)*, ou seja, o bloco de resina encontra-se dentro da garra, de modo que o topo da amostra está em contato com a ferramenta de fixação, com espaço apenas para a passagem da fibra. Esta configuração garante que a força está sendo aplicada diretamente a fibra, além de certificar a ortogonalidade entre a face superior do bloco de resina e a direção das forças de tração.

A máquina utilizada para o teste foi a Instron 4302 com célula de carga de 1000N e velocidade de deslocamento igual a 0,5 mm/min, de acordo com as Figura 42.

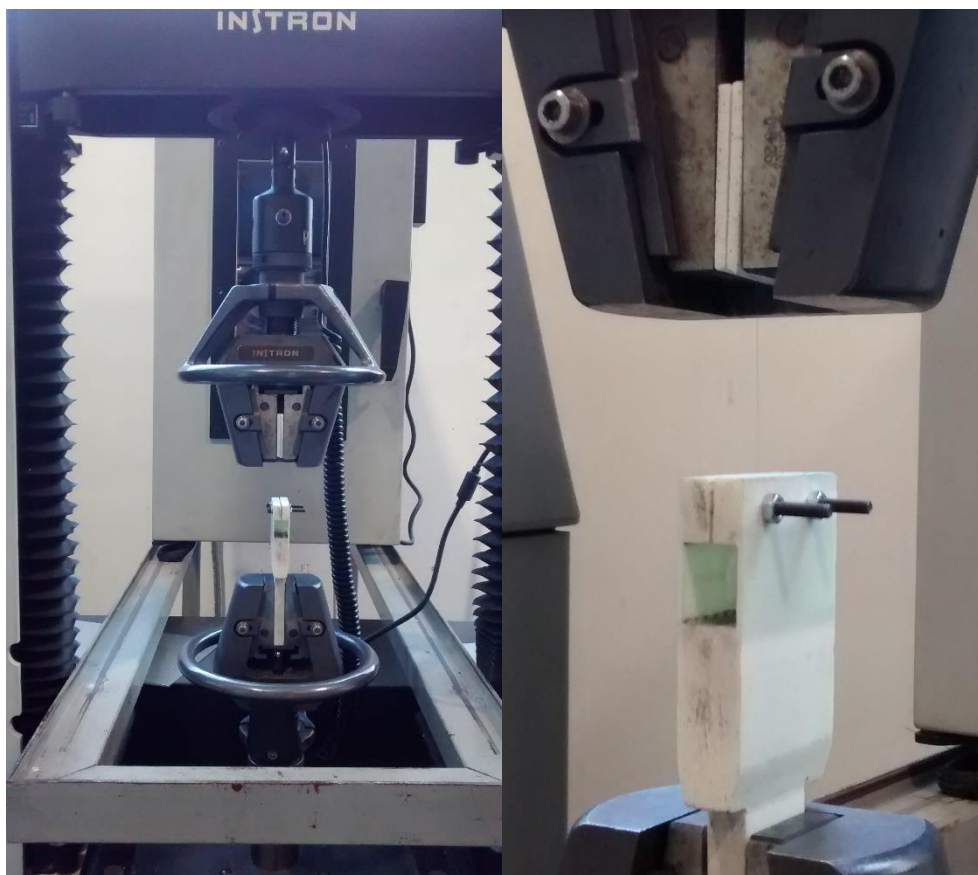


Figura 42: Máquina Instron para Teste de *Pull out*.

5.7 Microscopia Ótica e Eletrônica de Varredura

Ao término da execução dos testes de *Pull-out* foram realizadas análises de microscopia para averiguar o comportamento adesivo da interface resina e revestimento, dos diferentes tipos de fibra ótica, e comparar com os dados obtidos durante os ensaios.

Primeiramente as análises das fibras e dos blocos de resina foram feitas através de microscopia ótica, essa técnica foi suficiente para a análise das fibras, identificar a possível presença de revestimento na mesma, porém não foi capaz de medir o diâmetro da cavidade deixada no cubo de resina.

Devido a ineficiência da microscopia ótica na visualização superficial da interface entre *coating* e a matriz polimérica, fez-se uso da microscopia eletrônica de varredura (MEV). O princípio de funcionamento deste tipo de microscópio consiste na emissão de feixes de elétrons através de um filamento de tungstênio, portanto este tipo de técnica é ideal para materiais que possuem uma boa condutividade elétrica. Entretanto, este não é o caso da resina epóxi utilizada na fabricação dos corpos de prova.

A fim de melhorar a condutividade elétrica das amostras, foi realizada uma deposição química assistida por plasma (PACVD), a partir da utilização de um *Mini Sputter Coater*. No qual os cubos de resina foram inseridos na cápsula de vácuo e tiveram sua pressão reduzida até 2 Pa, seguido da produção de plasma de argônio para limpeza da superfície e deposição de uma fina camada de carbono, conforme Figura 43.



Figura 43: Deposição Química Assistida por Plasma.

Finalizada a deposição de carbono, os corpos de prova estavam aptos a serem investigados pela técnica de aquisição de imagens a partir de elétrons secundários, em baixo vácuo, do microscópio elétrico de varredura, Phenom ProX desktop SEM (Phenom World B.V.) presente no Laboratório de Opto Mecânica (LOM) da Universidade Federal Fluminense (UFF).

As imagens obtidas estão apresentadas e discutidas no Capítulo 6.

Capítulo 6

Análise dos Resultados

Neste capítulo são apresentados os principais resultados referente a identificação do posicionamento do sensor FBG na fibra ótica; resultados do teste de *Pull-out*; e da análise microscópica realizada.

6.1 Posicionamento do Sensor FBG

Conforme explicado no Capítulo 4, foi desenvolvido um teste para a identificação da posição de detectores FBG na fibra ótica através da exposição destes a estímulos térmicos, no caso o fio aquecido de uma máquina de corte CNC.

Para a execução dos ensaios foram utilizados os dados listados nas Tabelas 4 e 5:

Tabela 4: Comprimentos de Onda Padrão de cada FBG.

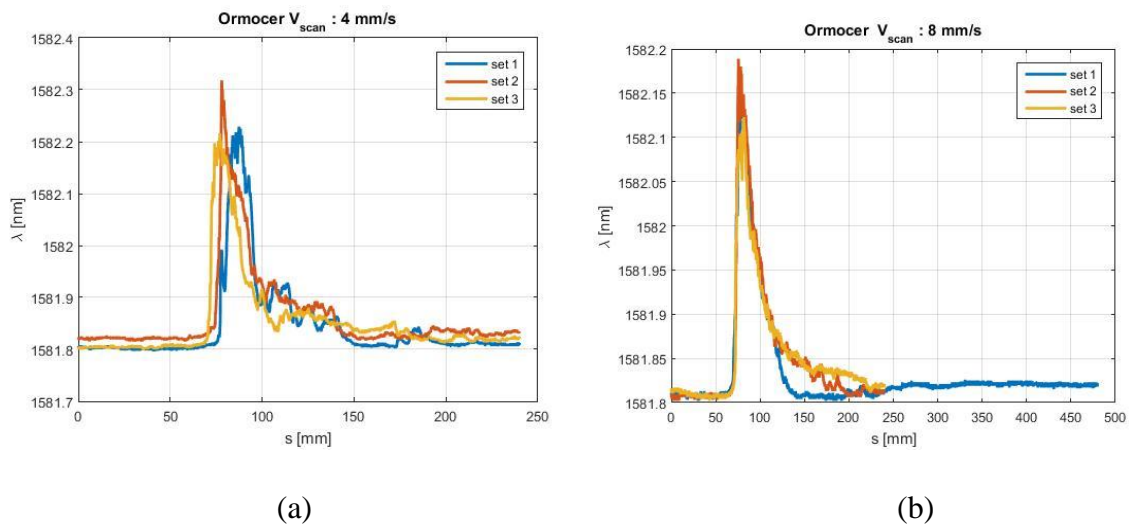
Canais de conexão com o interrogador	Tipos de Revestimentos	Comprimento de onda - λ (Segundo o Fabricante)	
CH 1 - FBG ₁	Poliacrilato	1564,9 nm	-
CH 2 – FBG ₂	Poliamida	1579 nm	-
CH 3 – FBG _{3 e 4}	Ormocerâmica	1566 nm	1581,8 nm
CH 4	Starter		

Tabela 5: Dados Utilizados no Teste.

	Poliacrilato	Poliamida	Ormocerâmica
Comprimento do sensor (L_{FBG})	10 mm	3 mm	3 mm
Comprimento da marcação da onde o sensor está localizado (mk)	17 mm	14 mm	32 mm
Altura entre os sensores e a placa de alumínio	0 ou 1 mm		
Altura da fonte de calor (h_{hot})	2 mm		
Velocidade de avanço (V_{scan})	4 a 16 mm/s		

A partir dos valores apresentados nas tabelas acima e o emprego de uma frequência de 100 Hz no interrogador, a primeira análise realizada foi para identificar a influência da velocidade de avanço da fonte de calor no comprimento de onda do sensor inscrito em cada tipo de fibra ótica, conforme os gráficos das Figuras 44 a 47.

Devido ao grande número de curvas geradas ao longo dos testes, aproximadamente 30, optou-se pela utilização de apenas 3 curvas (denominadas: set 1, 2 e 3) nos gráficos para facilitar a visualização do comportamento dos sensores ao estímulo térmico. Nestes gráficos estão presentes a relação de s – mm (deslocamento ao longo da fibra) x λ – mm (comprimento de onda do retículo de Bragg).

**Figura 44: (a) Sensor Ormocerâmico, Vel. 4mm/s e (b) Sensor Ormocerâmico, Vel. 8mm/s.**

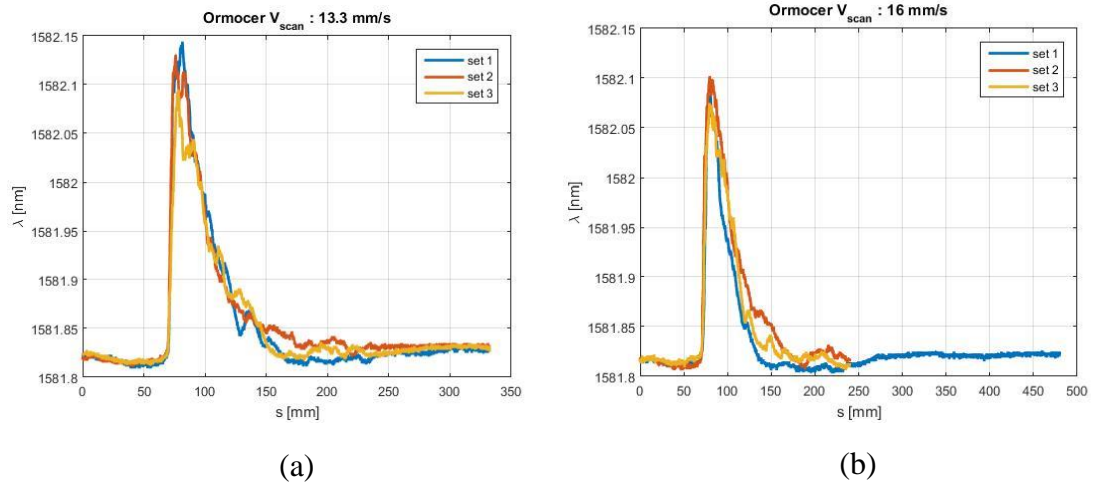


Figura 45: (a) Sensor Ormocerâmico, Vel. 13,3mm/s e (b) Sensor Ormocerâmico, Vel. 16mm/s.

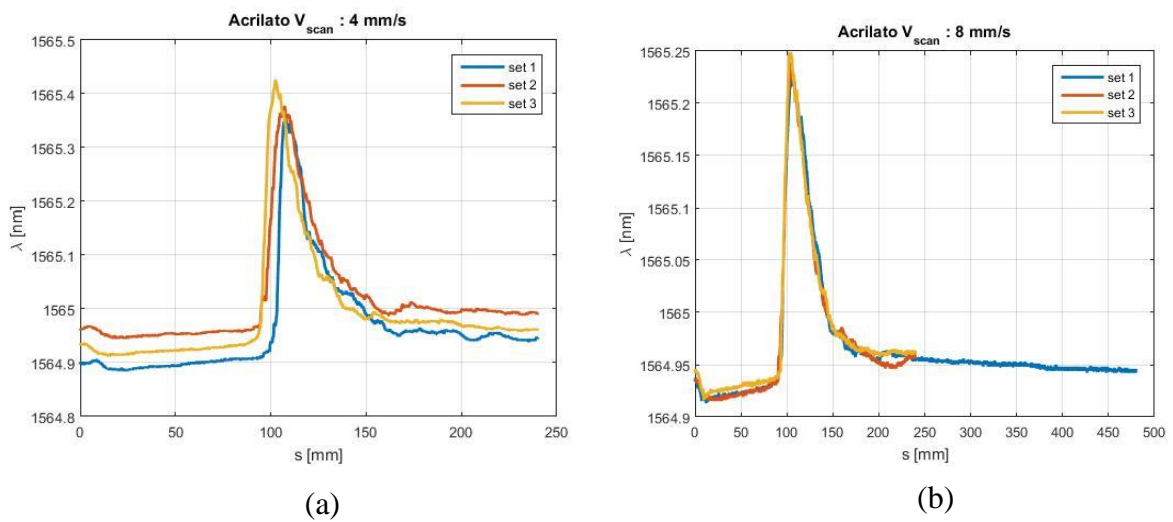


Figura 46: (a) Sensor Poliacrilato, Vel. 4mm/s e (b) Sensor Poliacrilato, Vel. 8mm/s.

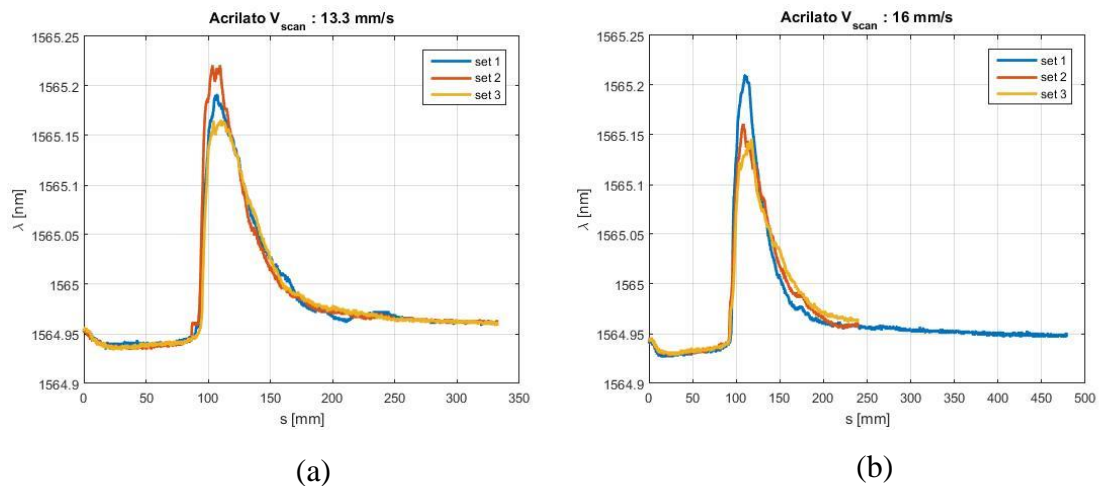


Figura 47: (a) Sensor Poliacrilato, Vel. 13,3mm/s e (b) Sensor Poliacrilato, Vel. 16mm/s.

Nos gráficos das Figuras 44 a 47 é possível observar uma similaridade no comportamento dos diferentes tipos de fibra em relação a velocidade, ou seja, com o aumento desta a dispersão entre as curvas de comprimento de onda pelo deslocamento se reduz, e a partir de uma velocidade de avanço (V_{scan}) equivalente a 8mm/s ocorre uma convergência no centro das curvas.

Também pode-se concluir que a amplitude de onda é inversamente proporcional ao aumento da velocidade, pois enquanto as fibras de poliacrilato possuem uma amplitude máxima de 1565,4 nm a uma velocidade de 4mm/s, a mesma fibra apresenta uma amplitude de 1565,2 nm a velocidade de 16mm/s, por exemplo. Este comportamento ocorre devido a maior exposição do sensor a fonte de calor durante a execução de testes com menor velocidade de avanço.

Sendo assim, a velocidade que apresentou a melhor convergência entre as curvas e uma elevada amplitude foi a de 8mm/s.

Outro fator analisado durante os testes foi a influência da altura entre os sensores e a chapa de alumínio, portanto foram realizados dois tipos de provas: o primeiro com as fibras óticas apoiadas sobre a chapa, ou seja, a altura é nula; e o segundo com uma altura de 1mm entre os componentes. Resultando nos gráficos das Figuras 48 e 49.

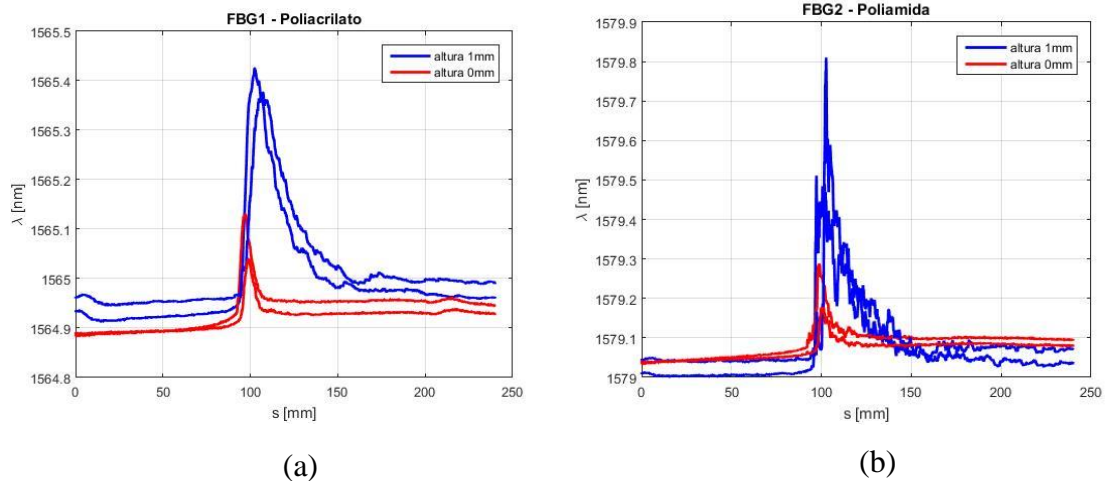


Figura 48: (a) Sensor FBG₁ – Poliacrilato e (b) Sensor FBG₂ - Poliamida.

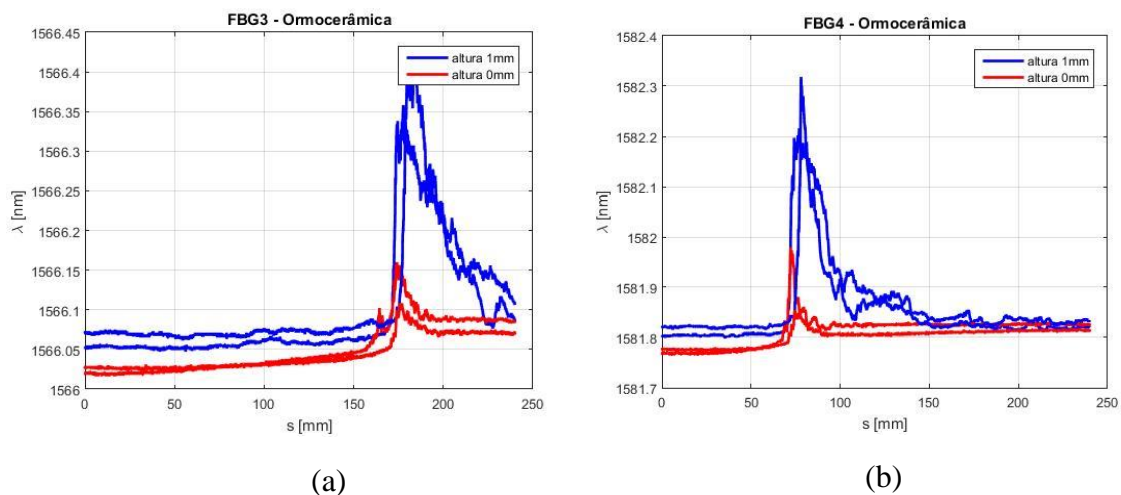


Figura 49: (a) Sensor FBG₃ – Ormocerâmica e (b) Sensor FBG₄ - Ormocerâmica.

Como explicado na seção 4.1.1.3.2 e pode ser confirmado nos gráficos das Figuras 48 e 49, a elevação dos sensores em relação a chapa de alumínio tem um efeito favorável na propagação de calor ao longo das fibras óticas, pois permite que todas as áreas das fibras estejam expostas a radiação térmica igualmente, o que não ocorreu quando as mesmas estavam em contato com a chapa. Este fenômeno é identificado através da variação da amplitude dos sinais emitidos pelos sensores FBG.

Ao término da realização destes ensaios preliminares, determinou-se que a velocidade de avanço do fio aquecido utilizada equivale a 8mm/s e os sensores sofreriam uma elevação de

1mm do suporte de fixação, para enfim poderem ser realizados os ensaios para identificação da posição dos detectores.

A determinação do posicionamento dos sensores foi realizada após 3 testes nos sentidos de ida e retorno do fio aquecido, pois foi identificada uma diferença no comportamento do comprimento de onda em relação ao sentido de avanço do fio aquecido.

Para o desenvolvimento matemático utilizou-se o conceito de propagação de calor por irradiação entre a fonte térmica e a fibra ótica, seguido de condução entre o revestimento e núcleo da fibra até o sensor, conforme Equação 21.

$$\dot{Q} = m * Cp * \frac{dT}{dt} \quad (21)$$

Levando em consideração o objetivo de se determinar a distância do centro do sensor, tendo conhecimento da velocidade de avanço empregada na operação de escaneamento e considerando que $Vscan = ds/dt$ obtêm-se a Equação 22.

$$\dot{Q} = m * Cp * Vscan * \frac{dT}{ds} \quad (22)$$

A partir da Equação 22 é possível determinar a região de atuação do sensor como aquela em que foi identificada a maior inclinação da curva, ou seja, onde a derivada é máxima. Já o pico de Bragg identificado durante os testes, ao contrário do que se imaginava, não representa o centro do sensor e sim a completa passagem da fonte térmica sobre o comprimento do sensor e, portanto, a máxima temperatura reconhecida pela zona sensível do mesmo.

Os resultados dos testes podem ser visualizados nas Figuras 50 e 51:

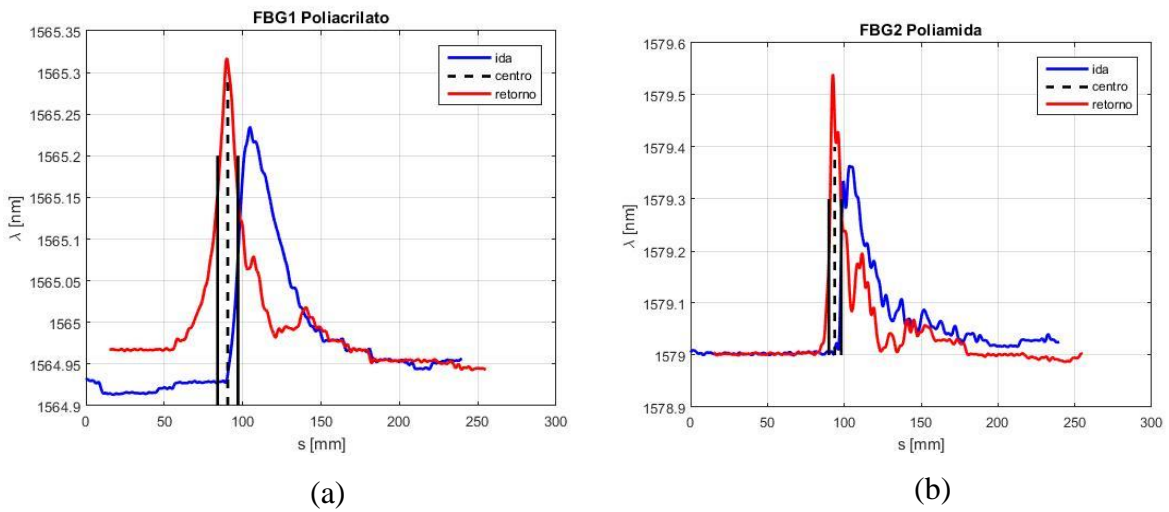


Figura 50: (a) Posição Sensor FBG₁ e (b) Posição Sensor FBG₂.

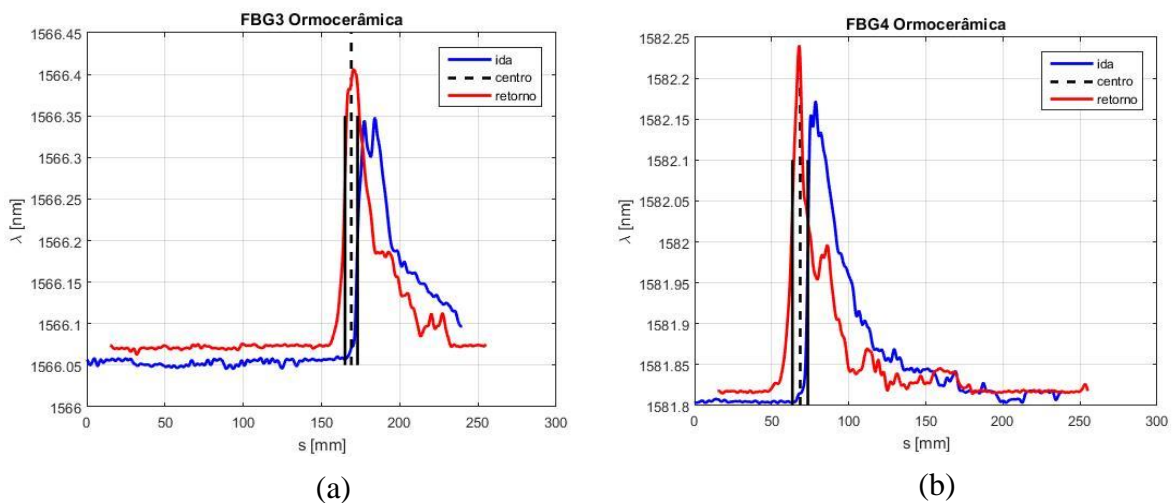


Figura 51: (a) Posição Sensor FBG₃ e (b) Posição Sensor FBG₄.

Nos gráficos presentes nas Figuras 50 e 51, as curvas azuis representam os dados obtidos no teste realizado no sentido denominado ida, enquanto que as curvas vermelhas os de retorno. As duas linhas verticais, da cor preta, de cada gráfico demarcam a região de máxima derivada das curvas de ida e retorno, ou seja, o comprimento da zona sensível de cada sensor e assim o posicionamento do seu centro.

Segue na Tabela 6, a distância de posicionamento do centro dos sensores adquiridas de forma experimental e o valor obtido através da consideração que o centro do sensor esteja entre os *markers* (distância demarcada pelo fabricante, na qual o sensor está presente).

Tabela 6: Confronto entre dados experimentais e Teóricos.

Sensor	Posição em mm (Forma experimental)	Posição em mm, sensor no centro dos <i>markers</i> .
FBG ₁	90,8	92,5
FBG ₂	93,8	94
FBG ₃	68,2	66
FBG ₄	168,5	167

Conforme os valores apresentados na Tabela 6, a técnica de identificação do posicionamento de sensores FBG através de estímulos térmicos se mostrou bastante eficiente quando comparados aos valores teóricos.

6.2 Resultados do Teste de *Pull-out*

Após a fabricação dos corpos de prova como descrito no Capítulo 5, foram realizados testes de *Pull-out* e a partir dos dados adquiridos foram traçadas curvas de força por deslocamento no intuito de descrever o comportamento de ruptura interfacial entre a fibra ótica e a matriz polimérica. E enfim, foi possível calcular a máxima tensão de cisalhamento suportada pelo conjunto.

Ao longo dos testes percebeu-se que o cisalhamento ocorre na interface *cladding/coating* e não *coating/resina*, identificando uma boa adesão da matriz polimérica a todos os tipos de revestimento. Dessa forma, torna-se importante a identificação da melhor característica de adesão entre o revestimento e a fibra em si.

Os resultados do teste para cada tipo de revestimento estão apresentados nas seções abaixo:

6.2.1 Fibras de Revestimento em Ormocerâmica - 115 μ m

As fibras óticas de revestimento em ormocerâmica são novas no mercado e não possuem muitos estudos sobre sua adesão em matrizes poliméricas, em especial para aplicações em materiais compósitos de estruturas inteligentes, fomentando assim a importância deste trabalho.

Segundo a empresa fabricante destas novas fibras, este tipo de coating não necessita de uma camada extra de recobrimento, comum nos revestimentos de poliacrilato e poliamida, conferindo a esses sensores revestidos por ormocerâmica diâmetros bastante reduzidos quando comparados aos demais.

Os dados dos ensaios das fibras de 115 μ m de diâmetro, ao contrário do que se esperava, apresentaram bons resultados de máxima tensão ao cisalhamento e força de extração da fibra, conforme gráfico da Figura 52. Porém, verificou-se uma maior suscetibilidade desse tipo de fibra a possíveis defeitos na fabricação dos corpos de prova como o desalinhamento da fibra, evidenciada devido a diferença entre a força máxima de ruptura de 20 N, indicada pelo fabricante, e àquela encontrada durante os testes.

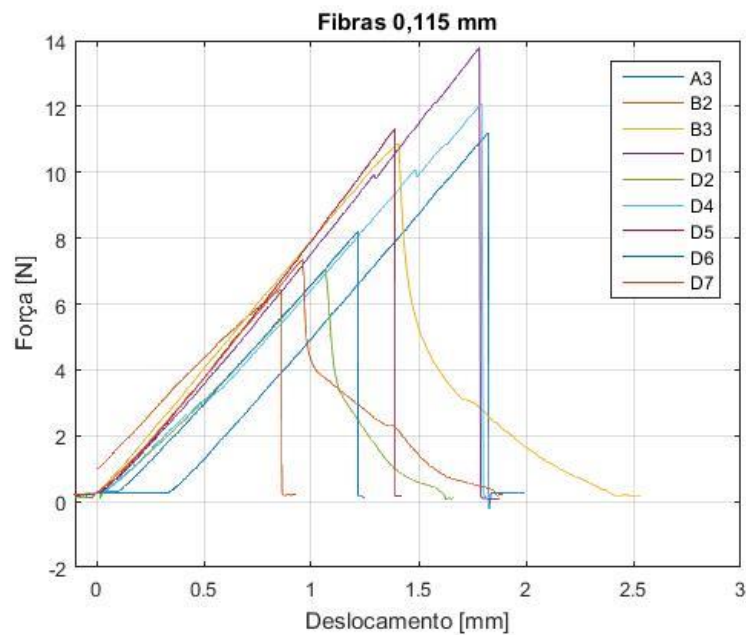


Figura 52: Gráfico Força x Deslocamento - 115 μ m.

As curvas do gráfico de força por deslocamento, presente na Figura 52, descrevem um comportamento a ruptura frágil, ou seja, após atingida a força máxima de extração da fibra inicia-se a repentina propagação da trinca e a imediata falha entre as interfaces do *cladding/coating*.

Ao final dos ensaios para as fibras de 115 μ m, verificou-se o comprimento de englobamento dos sensores na matriz polimérica através da utilização do programa *Image-J* (Figura 53).

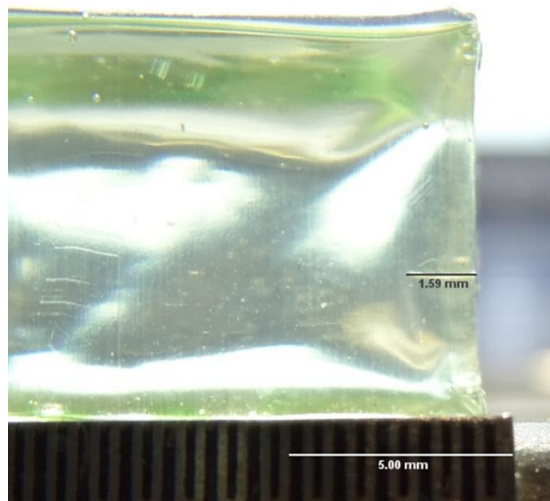


Figura 53: Medição da Profundidade de Englobamento da Fibra Após o Teste.

Ao término das medições do comprimento de englobamento de cada fibra e com os resultados dos ensaios, presentes na Tabela 7, desenvolveu-se o gráfico da Figura 54 que confronta os valores da força máxima de ruptura da fibra ótica com a máxima tensão de cisalhamento suportada pela interface para a determinação do comprimento crítico de englobamento.

Tabela 7: Dados Fibra de 115 μ m.

Corpos de Prova	Profundidade de Englobamento	Força Máxima	Tensão de Cisalhamento
A3	1,79 mm	11,2 N	24,9 MPa
B2	1,00 mm	6,4 N	25,5 MPa
B3	2,83 mm	10,9 N	15,3 MPa
D1	2,27 mm	13,8 N	24,1 MPa
D2	1,71 mm	7,0 N	16,4 MPa
D4	2,00 mm	12,1 N	24,0 MPa
D5	1,59 mm	11,3 N	28,3 MPa
D6	1,86 mm	8,2 N	17,5 MPa
D7	1,74 mm	7,3 N	16,8 MPa

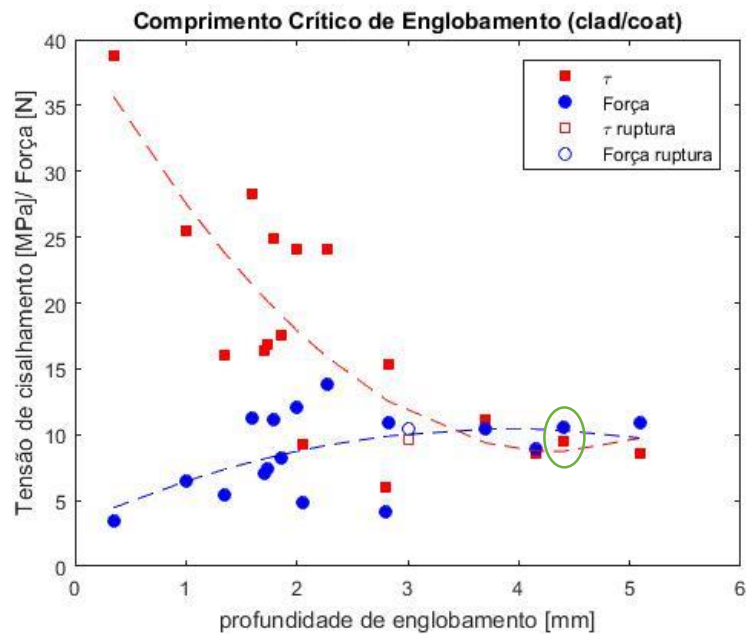


Figura 54: Relação entre a Tensão de Cisalhamento e a Força Máxima de Ruptura Mostrando o Comprimento Crítico de Englobamento Fibra de 115 μ m.

O gráfico da Figura 54 apresenta uma analogia entre o comportamento da tensão de cisalhamento entre as interfaces do revestimento e a fibra ótica; e da força de ruptura da própria fibra de acordo com o aumento do comprimento de englobamento dos sensores. Conforme pode ser observado no gráfico, com o aumento da profundidade de englobamento tem-se uma

redução da tensão máxima de cisalhamento suportada pela interface, e por consequência a tensão gerada pela força de ruptura da fibra aumenta, rompendo-a.

Também de acordo com o gráfico acima, é possível determinar o comprimento crítico de englobamento da fibra igual a 4,67 mm e uma tensão média de cisalhamento equivalente a 21,48 N/mm².

6.2.2 Fibras de Revestimento em Ormocerâmica - 220 μ m

As fibras de 220 μ m apresentam o mesmo comportamento frágil a ruptura que as de 115 μ m, porém durante a execução dos ensaios notou-se uma maior dispersão dos dados obtidos e um maior número de fibras rompidas. Segue abaixo o gráfico, Figura 55, do comportamento da força pelo deslocamento deste tipo de fibra.

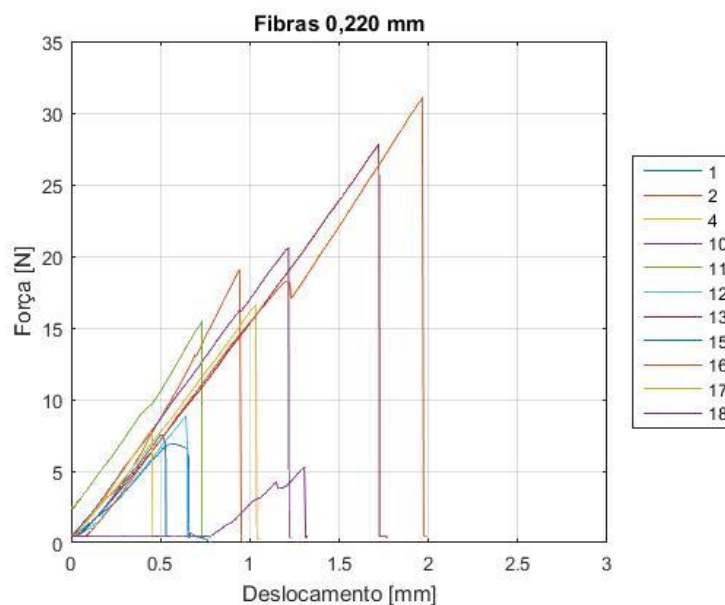


Figura 55: Gráfico Força x Deslocamento - 220 μ m.

Após os ensaios de *Pull-out*, foi determinada a profundidade de englobamento das amostras e as suas respectivas tensões de cisalhamento, detalhadas na Tabela 8. O gráfico de determinação do comprimento crítico de englobamento está representado na Figura 56.

Tabela 8: Dados Fibra de 220 μ m.

Corpos de Prova	Profundidade de Englobamento	Força Máxima	Tensão de Cisalhamento
1	1,05 mm	6,9 N	16,8 MPa
2	1,26 mm	19,1 N	38,6 MPa
4	1,03 mm	16,6 N	41,1 MPa
10	2,44 mm	20,6 N	21,5 MPa
11	2,03 mm	15,4 N	19,3 MPa
12	1,06 mm	8,83 N	21,2 MPa
13	1,03 mm	27,8 N	68,7 MPa
15	1,03 mm	7,5 N	18,7 MPa
16	1,81 mm	31,0 N	43,7 MPa
17	0,92 mm	7,8 N	21,5 MPa
18	0,81 mm	5,3 N	16,5 MPa

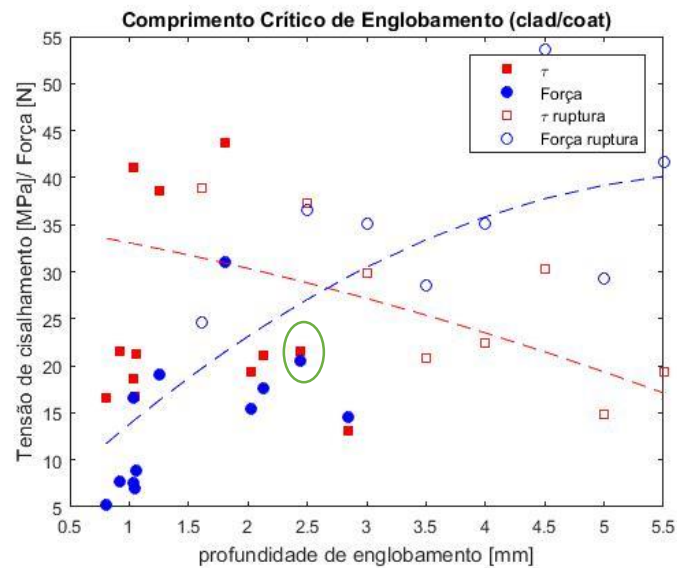


Figura 56: Relação entre a Tensão de Cisalhamento e a Força Máxima de Ruptura Mostrando o Comprimento crítico de Englobamento Fibra de 220 μ m.

A partir do gráfico acima, pode-se evidenciar um maior número de rupturas na própria fibra durante os testes, indicando a possível presença de defeitos nas amostras como a produção de bolhas durante a cura da resina que posteriormente influenciaram nos resultados. Para a fibra

de 220 μ m foi encontrado um comprimento crítico de 2,5 mm e uma tensão máxima de sollicitação da interface equivalente a 25,88 N/mm².

6.2.3 Fibras de Revestimento em Poliacrilato

As fibras de revestimento em Poliacrilato apresentam uma curva característica de força pelo deslocamento, na qual a amostra sofre um pico inicial de força, seguido de um platô que descreve o comportamento plástico do revestimento e o contributo do atrito gerado, para a extração da fibra, conforme a Figura 57.

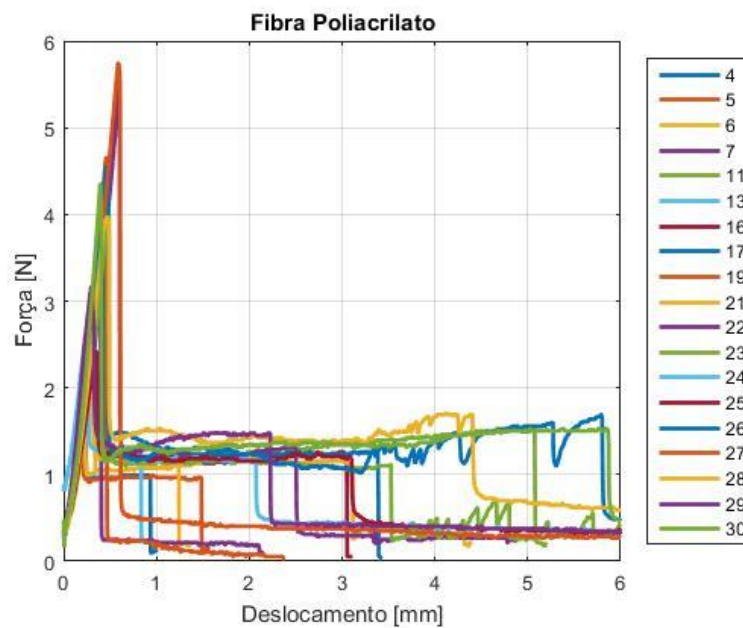


Figura 57: Gráfico Força x Deslocamento - poliacrilato.

Constam na Tabela 9 os dados obtidos durante as provas de Pull-out das fibras de revestimento em poliacrilato.

Tabela 9: Dados Fibra de poliacrilato.

Corpos de Prova	Profundidade de Englobamento	Força Máxima	Tensão de Cisalhamento
4	1,64 mm	1,8 N	2,7 MPa
5	2,02 mm	1,2 N	1,5 MPa
6	2,29 mm	1,5 N	1,6 MPa
7	2,6 mm	3,3 N	3,3 MPa
11	2,8 mm	2,4 N	2,2 MPa
13	1,65 mm	2,1 N	3,2 MPa
16	2,8 mm	4,1 N	3,7 MPa
17	2,56 mm	3,7 N	3,6 MPa
19	2,82 mm	4,7 N	4,2 MPa
21	5,13 mm	1,2 N	1,2 MPa
22	6,1 mm	5,5 N	2,3 MPa
23	6,86 mm	4,1 N	1,5 MPa
24	7,88 mm	1,2 N	0,9 MPa
25	7,48 mm	1,2 N	0,8 MPa
26	8,66 mm	4,6 N	1,3 MPa
27	8,93 mm	5,7 N	1,6 MPa
28	14,58 mm	1,5 N	0,7 MPa
29	11,70 mm	3,2 N	0,7 MPa
30	12,14 mm	4,35 N	0,9 MPa

O comprimento crítico de englobamento desse tipo de fibra é acima de 15 mm e sua tensão média de cisalhamento equivale a 2,96 N/mm², conforme Figura 58.

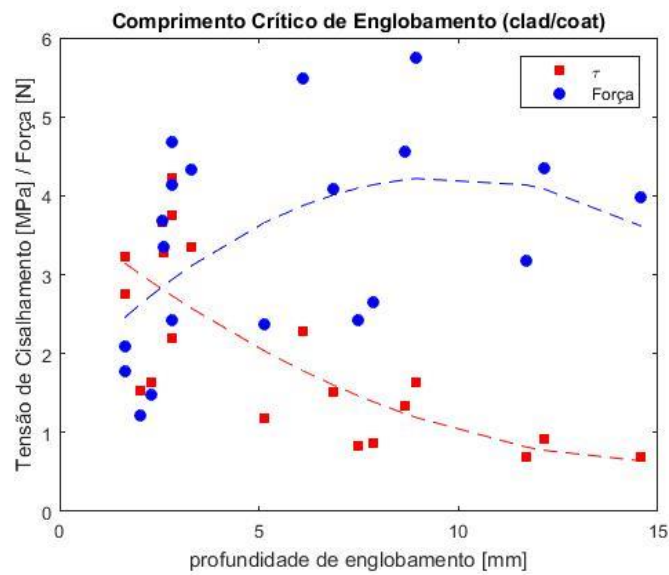


Figura 58: Relação entre a Tensão de Cisalhamento e a Força Máxima de Ruptura Mostrando o Comprimento crítico de Englobamento Fibra de poliacrilato.

Como foi citado anteriormente, o comprimento crítico de englobamento das fibras com revestimento de poliacrilato supera os 15 mm, isso ocorre devido à baixa resistência interfacial entre *cladding/coating*, ou seja, possuem uma baixa resistência a tensões de cisalhamento, justificando os baixos valores encontrados. E, apesar da força máxima do ensaio gerar tensões superiores as de interface, grande parte desta força está sendo convertida em trabalho da força de atrito durante a extração, devido a plasticidade do poliacrilato, não atuando diretamente no rompimento entre as interfaces.

6.2.4 Fibras de Revestimento em Poliamida

As fibras cujo revestimento é composto de poliamida são, atualmente, as mais utilizadas em sistemas de monitoramento de pás de rotores de helicópteros e já possuem vários estudos quanto a sua adesão interfacial em matrizes poliméricas descritos por vários autores.

Essas fibras, assim como ocorre nas de ormoocerâmica, apresentam comportamento frágil a ruptura das interfaces entre o *cladding/coating*, ou seja, possui o cedimento imediato após a força máxima de ruptura. Apresenta um baixo comprimento crítico de englobamento, cerca de 2,00 mm e uma tensão de cisalhamento média equivalente a 25,14 MPa.

Os demais dados obtidos ao longo dos testes estão listados na Tabela 10.

Tabela 10: Dados Fibra de poliamida.

Corpos de Prova	Profundidade de Englobamento	Força Máxima	Tensão de Cisalhamento
4	0,9 mm	10,2 N	28,9 MPa
5	1,20 mm	8,7 N	18,4 MPa
6	1,50 mm	9,45 N	16 MPa
9	1,20 mm	10,47 N	22,2 MPa
10	1,30 mm	10,95 N	21,4 MPa
11	1,40 mm	20,59 N	33,4 MPa
12	1,50 mm	23,01 N	34,9 MPa
13	1,60 mm	17,21 N	24,4 MPa
14	1,70 mm	19,84 N	26,5 MPa

6.3 Microscopia Ótica e Eletrônica de Varredura

Depois da realização dos testes de *Pull-out*, os corpos de prova tiveram suas superfícies analisadas através da microscopia ótica e eletrônica de varredura, a fim de se averiguar os efeitos da extração tanto na fibra quanto na matriz polimérica, como pode ser visualizado nas seções abaixo.

6.3.1 Microscopia Ótica

A microscopia ótica foi utilizada para a verificação do estado da fibra e do seu revestimento após o ensaio de extração.

A primeira fibra a ser analisada foi a de poliacrilato (Figura 59) e foi comprovado o comportamento elasto/plástico do revestimento em poliacrilato, que está representado pela presença do *coating* com o comprimento maior daquele inicial, fixado no bloco de resina, caracterizando um aumento dimensional devido a plasticidade do mesmo.

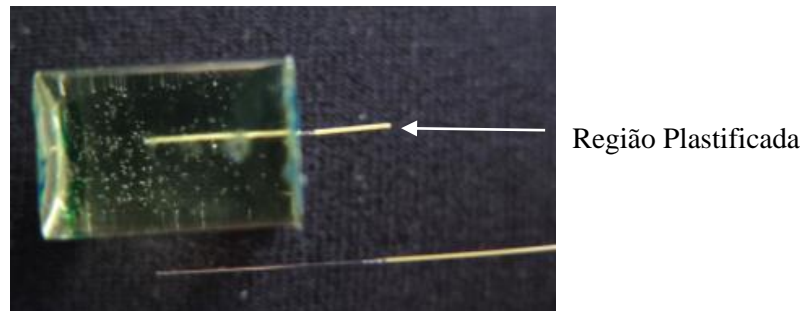


Figura 59: Comportamento Plástico Revestimento de Poliacrilato.

Em seguida, observou-se as fibras de revestimento em ormocerâmica, conforme a Figura 60 (a) e (b). Após a extração da fibra de $115\mu\text{m}$ do bloco de resina, a mesma está com o *cladding* completamente exposto, ou seja, o revestimento apresenta uma excelente aderência a matriz epóxi. Já o *coating* da fibra de maior diâmetro apresentou parte do seu revestimento aderido ao *cladding*.

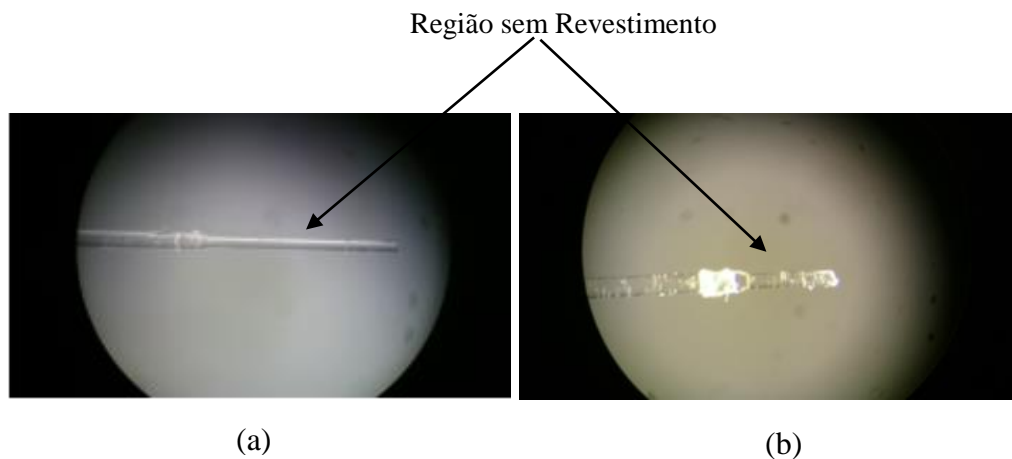


Figura 60: (a) Fibra de $115\mu\text{m}$ e (b) Fibra de $220\mu\text{m}$.

As fibras de revestimento em poliamida apresentaram duas interfaces distintas de ruptura: a primeira, similar ao comportamento da fibra de ormocerâmica, rompeu-se entre o *cladding/coating* (Figura 61 (a)); já na segunda à ruptura ocorre entre o revestimento e a matriz (Figura 61 (b)).

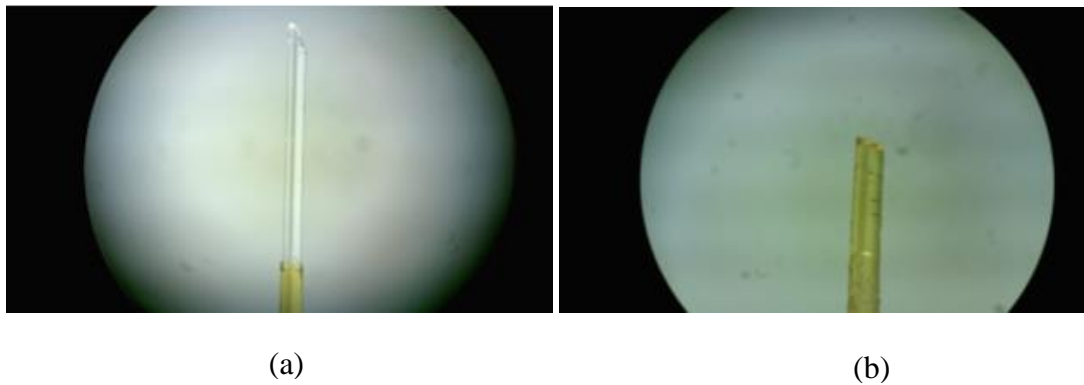


Figura 61:(a) Interface cladding/coating e (b) Interface revestimento/matriz.

6.3.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

O MEV foi utilizado para confirmar a presença do revestimento aderido as amostras de resina e tentar identificar a formação de trincas e sua propagação durante os testes.

As primeiras análises foram realizadas com um aumento de 135 vezes, conforme as Figuras 62 e 63.

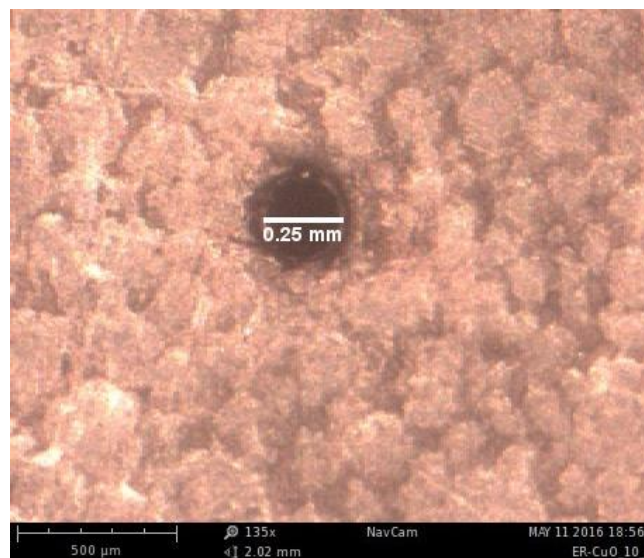


Figura 62: Detalhe da Cavidade - Revestimento de Poliacrilato.

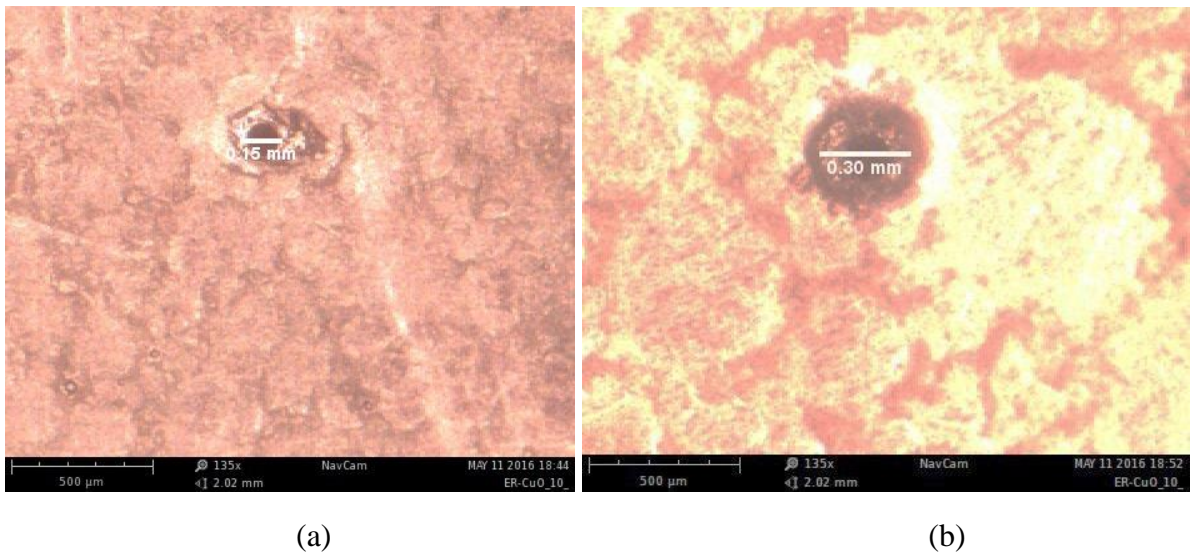


Figura 63: (a) Fibra de 115µm e (b) Fibra de 220µm.

As imagens acima apresentam as cavidades deixadas nos cubos de resina após os testes de extração. Nestas figuras percebeu-se que a cavidade deixada pela fibra de revestimento em poliacrilato não apresentou grandes variações do diâmetro inicial do sensor, ou seja, não há presença de rebarbas e acúmulo de revestimento na superfície da matriz, fator que pode ser explicado pelas características elasto/plásticas desse *coating*. Porém, o mesmo não pode ser dito para o revestimento em ormocerâmica que apresentou um acréscimo dimensional na região do revestimento. A fim de verificar com maior exatidão o comportamento do *coating* em Ormocer®, ampliou-se o aumento do MEV para 530 vezes como apresentado na Figura 64.

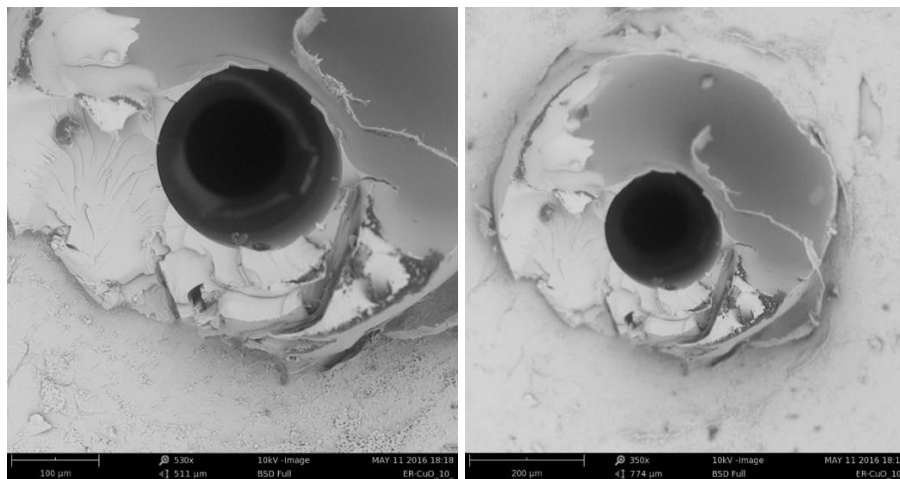


Figura 64: Detalhe da Cavidade - Fibra 220µm, Revestimento de Ormocerâmica.

Na Figura 64 é possível observar claramente a propagação das trincas que levaram ao cedimento da interface *cladding/coating* e a presença do revestimento plenamente aderido à superfície da matriz, demonstrando uma excelente adesão entre o revestimento e a resina epoxídica. Também se comprovou a presença de rebarbas, devido à presença de vários planos na imagem ampliada, provavelmente provenientes de regiões de revestimentos que apenas estavam em contato com a fibra que ao ocorrer a extração permaneceram agrupadas ao cubo de resina.

6.4 Entendimentos Gerais

Este trabalho apresenta resultados da investigação da adesão entre os revestimentos, de poliacrilato e poliamida, na matriz epoxídica bastante concordante com os valores apresentados por Tessadori, 2011 e Marcollin, 2010; de tal forma que se tornou possível validar a técnica utilizada e realizar os testes nas novas categorias de fibras, revestimento de Ormocer®) que estão sendo fabricadas.

Os testes realizados demonstram que as Fibras de poliacrilato apresentam uma baixa adesão entre o cladding e coating, sendo representada pelo elevado comprimento crítico encontrado, se comparado com as demais fibras; as propriedades mecânicas deste revestimento são menos resistentes e possuem particular plasticidade levando a necessidade de baixos esforços, cerca de dez vezes menores que àqueles atuantes nas fibras cerâmicas, para sua completa extração da matriz.

Ambas fibras de revestimento em ormocerâmica apresentaram um excelente desempenho quando comparadas as de poliamida, e apesar de seu comportamento frágil a ruptura possuem uma boa adesão entre a fibra em si e seu revestimento, além da capacidade de resistir as tensões de cisalhamento mesmo em condições de menor comprimento englobado.

Capítulo 7

Conclusões

Com o avanço tecnológico, constante necessidade de redução de custos de operação e manutenção nas empresas aeronáuticas, foram desenvolvidos os materiais inteligentes e suas aplicabilidades em sistemas de monitoramento estrutural (SHM).

Atualmente, a indústria de helicópteros vem demonstrando ser um dos segmentos que mais tem determinado investimento e pesquisas e na implementação desses materiais, principalmente os de matrizes compósitas. O investimento em pauta tem como foco primordial a fabricação das pás dos rotores dos helicópteros, um dos componentes mais importantes da estrutura, a ser realizada a partir de laminados com fibras óticas englobadas.

O presente trabalho teve como propósito otimizar as técnicas utilizadas no englobamento de sensores FBG e investigar a aplicabilidade deste novo tipo de fibra ótica comercializada, cujo revestimento é de ormocerâmica. Dessa forma, foi desenvolvida uma técnica modernizada de proteção das fibras óticas durante a produção de laminados, que ocorre através da utilização de um inserto metálico *by-pass* a ser inserido ao molde da fabricação do material compósito. Concluiu-se, após a realização de vários testes, a validação da técnica e a possibilidade de implantação do seu conceito a nível industrial.

Por conseguinte, foi desenvolvido um método de identificação de posicionamento dos sensores, ideal para aplicações em larga escala e com segurança suficiente para não proporcionar riscos de ruptura às fibras.

Outro estudo importante foi o de adesão entre os diferentes tipos de revestimento dos sensores FBG na matriz polimérica, possibilitando definir aquelas que apresentam um maior desempenho quanto a transferência dos esforços sofridos pelo material anfitrião as fibras óticas.

Os resultados obtidos indicam que o comportamento das fibras com revestimento de Ormocer® apresentam excelentes características mecânicas e possuem propriedades muito semelhantes as fibras de Poliamida (utilizada em larga escala para monitoramento estrutural). Embora, as fibras de Poliamida apresentem menor diâmetro e, por consequência, menor invasividade, as fibras de revestimento cerâmico apresentam inúmeras vantagens como: ampla abertura numérica evitando efeitos de *bending loss*, elevada resistência mecânica e custo

reduzido; sendo ótimas substitutas as fibras de Poliamida. Dessa forma, ambas as fibras de ormoocerâmica são excelentes substitutas das de poliamida, em especial as fibras de diâmetro equivalente a $115\mu\text{m}$ por gerarem uma menor invasividade do sistema.

7.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Como sugestão para trabalhos futuros coloca-se a necessidade de realizar provas estáticas e dinâmicas para comprovar o funcionamento do sensor, na condição de englobado no laminado, ao longo de solicitações térmicas e mecânicas. Outra sugestão considerável seria averiguar o desempenho a fadiga desse tipo de estrutura de forma que se possa estimar a vida útil do sensor presente no material anfitrião, assim como a possibilidade de utilizar ferramentas de elementos finitos e estudos numéricos que possam descrever este comportamento, tornando cientificamente provada a segurança e adequabilidade deste novo conjunto de material inteligente e o seu uso.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- [1] SALA, G.; DI LANDRO, L.; AIROLDI, A.; BETTINI, P. *Tecnologie e Materiali Aerospaziali*, Milano: Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale - Politecnico di Milano.
- [2] *Aviation Images*. Disponível em: <<http://www.b-domke.de/AviationImages.html>>. Acesso em 2016 maio 2016.
- [3] TESSADORI, E.; SALA, G.; BETTINI, P. *Misure di Deformazione e Temperatura Mediante Sensori a Fibra Ottica: Tecniche di Disaccoppiamento del Segnale*, Politecnico di Milano, 2011.
- [4] MARCOLIN, G.; SALA, G.; BETTINI, P.; AGAZZANI, P. A. *Monitoraggio Strutturale di una Pala di Rotore di Elicottero: Realizzazione di un dimostratore tecnologico*, Politecnico di Milano, 2010.
- [5] STASZEWSKI, W.; BOLLER, C.; TOMLINSON, G. *Health Monitoring of Aerospace Structures - Smart Technologies and Signal Processing*. John Wiley & Sons Ltd, 2004.
- [6] ACCAROLI, L.; BETTINI, P.; SALA, G. *Monitoraggio Strutturale di Giunzione in Composito : proposta di un indice di danno*, Politecnico di Milano, 2013.
- [7] BOUKABACHE, H.; ESCRIBA, C.; FOURNIOLS, J.Y. Toward Smart Aerospace Structures: Design of a Piezoelectric Sensor and Its Analog Interface for Flaw Detection, *Sensors*, vol. 14, nº 11 (State-of-the-Art Sensors Technology in France), 2014.
- [8] Lopez-Higuera, Fiber Optic Sensors in Structural Health Monitoring, *Jornaul of Lightwave Technology*, vol. 29, nº 4, pp. 587-608, 2011.
- [9] DOS SANTOS, A. D. F. *Proposta de Gerenciamento de Dados para Monitoramento de Saúde Estrutural Utilizando Redes de Sensores Ópticos FBG*, Universidade do Pará - Intituto de Tecnologia (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica), 2014.
- [10] SALA, D.; TAGLIABUE, P.; BETTINI, P.; SALA, G. *Studio Numerico e Sperimentale di Sensori a Fibra Ottica per Appllicazioni di Structural Health Monitoring*, Politecnico di Milano, Milão, 2012.
- [11] BETZ, D.; THURSBY, G.; CULSHAW, B.; STASZEWSKI, W. Structural damage location with fiber bragg grating rosettes and lamb waves, em *Structural Health Monitoring*, 2007, pp. 299-308.
- [12] DE OLIVEIRA, R.; RAMOS, C.; MARQUES, A. Health monitoring of composite structures by embedded fbg and interferometric fabry-pérot sensors, em *Computers & Structures*, 2007.

- [13] *Hangar 33*. Disponível em: <<http://blog.hangar33.com.br/a-era-dos-compositos-na-fabricacao-das-aeronaves>>. Acesso em 14 maio 2016.
- [14] *United Electronic Industries*. Disponível em: <<https://ueidaq.wordpress.com/category/strain-gauge>>. Acesso em 14 maio 2016.
- [15] *Flight Safety Australia*. Disponível em: <<http://www.flightsafetyaustralia.com>>. Acesso em 14 maio 2016.
- [16] *Intech (Open Science)*. Disponível em: <<http://www.intechopen.com>>. Acesso em 14 maio 2016.
- [17] ROCCA, D.; SALA, G.; BETTINI, P. *Monitoraggio Strutturale di una Pala Mediante FBG*, Politecnico di Milano, 2016.
- [18] BOGOTTO, SALA, G.; BETTINI, P. *Monitoraggio di componenti strutturali aeronautici con sensori in fibra ottica*, Politecnico di Milano, 2015.
- [19] *National Instruments*. Disponível em: <<http://www.ni.com/kb/pt>>. Acesso em 14 maio 2016.
- [20] *Scaime Industrie*. Disponível em: <<http://www.scaime.com>>. Acesso em 14 maio 2016.
- [21] *Dipartimento di Scienze e Tecnologie Aerospaziale*. Disponível em: <<http://www.aero.polimi.it>>. Acesso em 22 05 2016.
- [22] NASTUZZO, P.; BETTINI, P.; DISCEPOLI, C.; SALA, G. *Inglobamento di Sensori a Fibra Ottica per il Monitoraggio Strutturale di Pale di Elicottero: Aspetti Tecnologici e Caratterizzazione Sperimentale*, Politecnico di Milano, 2007.
- [23] CUCCO, J.; BETTINI, P.; SALA, G. *Attuatori SMA per Laminati Intelligenti: Problematiche Tecnologiche e Funzionali*, Politecnico di Milano, 2008.

APÊNDICE

A.1 Script MATLAB – Análise de Adesão

O programa de MATLAB apresentado abaixo foi desenvolvido em conjunto com o mestrando Daniele Rocca, aluno do Politecnico di Milano, cujo objetivo é analisar os dados obtidos nos testes de Pull-Out e determinar o comprimento crítico de englobamento dos sensores FBG na matriz epoxídica.

```
% resultados teste pull-out

close all; clear all; clc

d = 0.08; %mm diametro da fibra coating
De = 0.115; %mm diametro da fibra cladding

% importação dos dados
val= importdata(sprintf('./dati_115/A1.dat'),' ',24);
FA1=val.data(:,3)./0.224808;
SA1=val.data(:,2)./0.03937008;

val= importdata(sprintf('./dati_115/A2.dat'),' ',24);
FA2=val.data(:,3)./0.224808;
SA2=val.data(:,2)./0.03937008;

val= importdata(sprintf('./dati_115/A3.dat'),' ',24);
FA3=val.data(:,3)./0.224808;
SA3=val.data(:,2)./0.03937008;

val= importdata(sprintf('./dati_115/B1.dat'),' ',24);
FB1=val.data(:,3)./0.224808;
SB1=val.data(:,2)./0.03937008;

val= importdata(sprintf('./dati_115/B2.dat'),' ',24);
FB2=val.data(:,3)./0.224808;
SB2=val.data(:,2)./0.03937008;

val= importdata(sprintf('./dati_115/B3.dat'),' ',24);
FB3=val.data(:,3)./0.224808;
SB3=val.data(:,2)./0.03937008;

val= importdata(sprintf('./dati_115/D1.dat'),' ',24);
FD1=val.data(:,3)./0.224808;
SD1=val.data(:,2)./0.03937008;

val= importdata(sprintf('./dati_115/D2.dat'),' ',24);
FD2=val.data(:,3)./0.224808;
SD2=val.data(:,2)./0.03937008;

val= importdata(sprintf('./dati_115/D3.dat'),' ',24);
FD3=val.data(:,3)./0.224808;
SD3=val.data(:,2)./0.03937008;
```



```
val= importdata(sprintf('./dati_115/D4.dat'),' ',24);
FD4=val.data(:,3)./0.224808;
SD4=val.data(:,2)./0.03937008;

val= importdata(sprintf('./dati_115/D5.dat'),' ',24);
FD5=val.data(:,3)./0.224808;
SD5=val.data(:,2)./0.03937008;

val= importdata(sprintf('./dati_115/D6.dat'),' ',24);
FD6=val.data(:,3)./0.224808;
SD6=val.data(:,2)./0.03937008;

val= importdata(sprintf('./dati_115/D7.dat'),' ',24);
FD7=val.data(:,3)./0.224808;
SD7=val.data(:,2)./0.03937008;

val= importdata(sprintf('./dati_115/E1.dat'),' ',24);
FE1=val.data(:,3)./0.224808;
SE1=val.data(:,2)./0.03937008;

val= importdata(sprintf('./dati_115/E2.dat'),' ',24);
FE2=val.data(:,3)./0.224808;
SE2=val.data(:,2)./0.03937008;

val= importdata(sprintf('./dati_115/E3.dat'),' ',24);
FE3=val.data(:,3)./0.224808;
SE3=val.data(:,2)./0.03937008;

val= importdata(sprintf('./dati_115/P21.dat'),' ',24);
FP21=val.data(:,3)./0.224808;
SP21=val.data(:,2)./0.03937008;

val= importdata(sprintf('./dati_115/P22.dat'),' ',24);
FP22=val.data(:,3)./0.224808;
SP22=val.data(:,2)./0.03937008;

val= importdata(sprintf('./dati_115/P23.dat'),' ',24);
FP23=val.data(:,3)./0.224808;
SP23=val.data(:,2)./0.03937008;

val= importdata(sprintf('./dati_115/P25.dat'),' ',24);
FP25=val.data(:,3)./0.224808;
SP25=val.data(:,2)./0.03937008;

val= importdata(sprintf('./dati_115/P26.dat'),' ',24);
FP26=val.data(:,3)./0.224808;
SP26=val.data(:,2)./0.03937008;

val= importdata(sprintf('./dati_115/P27.dat'),' ',24);
FP27=val.data(:,3)./0.224808;
SP27=val.data(:,2)./0.03937008;

val= importdata(sprintf('./dati_115/P28.dat'),' ',24);
FP28=val.data(:,3)./0.224808;
SP28=val.data(:,2)./0.03937008;
```

```

val= importdata(sprintf('./dati_115/P29.dat'),' ',24);
FP29=val.data(:,3)./0.224808;
SP29=val.data(:,2)./0.03937008;

val= importdata(sprintf('./dati_115/P30.dat'),' ',24);
FP30=val.data(:,3)./0.224808;
SP30=val.data(:,2)./0.03937008;

% grafico todas as provas

figure (1)
plot(SA1,FA1,SA2,FA2,SA3,FA3,SB1,FB1,SB2,FB2,SB3,FB3,SD1,FD1,SD2,FD2,SD3,FD3,SD4,FD4,SD5,FD5,SD6,FD6,SD7,FD7,SE1,FE1,...

SE2,FE2,SE3,FE3,SP21,FP21,SP22,FP22,SP23,FP23,SP25,FP25,SP26,FP26,SP27,FP27,SP28,FP28,SP29,FP29,SP30,FP30);
grid on;
legend('A1','A2','A3','B1','B2','B3','D1','D2','D3','D4','D5','D6','D7','E1','E2','E3',...
'P21','P22','P23','P25','P26','P27','P28','P29','P30','Location','EO')
xlabel('deslocamento [mm]');ylabel('Força[N]');title('Fibra de 0,115 mm');

% grafico corpos de prova extraídos
OS = 0.25; %offset para alinhar os gráficos
figure (2)
plot(SA3-SA3(find(FA3 > OS,1)),FA3,SB2-SB2(find(FB2 > OS,1)),FB2,SB3-SB3(find(FB3 > OS,1)),FB3,SD1-SD1(find(FD1 > OS,1)),FD1,SD2-SD2(find(FD2 > OS,1)),FD2,...
SD4-SD4(find(FD4 > OS,1)),FD4,SD5-SD5(find(FD5 > OS,1)),FD5,SD6-SD6(find(FD6 > OS,1)),FD6,SD7-SD7(find(FD7 > OS,1)),FD7);
xlim([-0.1 3])
grid on;
xlabel('Deslocamento [mm]');ylabel('Força [N]');title('Fibras Extraídas');
legend('A3','B2','B3','D1','D2','D4','D5','D6','D7','Location','NE')

% profundidade da cavidade

CA1 = 2.34;
CA2 = 2.21;
CA3 = 1.79;
CA4 = 2.47;
CB1 = 2.4;
CB2 = 1;
CB3 = 2.83;
CD1 = 2.27;
CD2 = 1.71;
CD3 = 2.20;
CD4 = 2;
CD5 = 1.59;
CD6 = 1.86;
CD7 = 1.74;
CE1 = 4.45;
CE2 = 0.44;
CE3 = 2.07;
CP21 = 2.05;

```

```

CP22 = 1.35;
CP23 = 0.35;
%CP24 RUPTURA DURANTE A MONTAGEM
CP25 = 4.40;
CP26 = 4.15;
CP27 = 5.09;
CP28 = 3.7;
CP29 = 3.0;
CP30 = 2.8;

```

```
%valor das Tensões com d = 0.08 in N/mm^2
```

```

tau_A3 = max(FA3)/pi/d/CA3;
tau_B2 = max(FB2)/pi/d/CB2;
tau_B3 = max(FB3)/pi/d/CB3;
tau_D1 = max(FD1)/pi/d/CD1;
tau_D2 = max(FD2)/pi/d/CD2;
tau_D4 = max(FD4)/pi/d/CD4;
tau_D5 = max(FD5)/pi/d/CD5;
tau_D6 = max(FD6)/pi/d/CD6;
tau_D7 = max(FD7)/pi/d/CD7;
tau_P21 = max(FP21)/pi/d/CP21;
tau_P22 = max(FP22)/pi/d/CP22;
tau_P23 = max(FP23)/pi/d/CP23;
tau_P25 = max(FP25)/pi/d/CP25;
tau_P26 = max(FP26)/pi/d/CP26;
tau_P27 = max(FP27)/pi/d/CP27;
tau_P28 = max(FP28)/pi/d/CP28;
tau_P30 = max(FP30)/pi/d/CP30;

```

```
% ruptura
```

```

tau_A1 = max(FA1)/pi/De/CA1;
tau_A2 = max(FA2)/pi/De/CA2;
tau_B1 = max(FB1)/pi/De/CB1;
tau_D3 = max(FD3)/pi/De/CD3;
tau_E1 = max(FE1)/pi/De/CE1;
tau_E2 = max(FE2)/pi/De/CE2;
tau_E3 = max(FE3)/pi/De/CE3;
tau_P29 = max(FP29)/pi/De/CP29;

```

```
%valor da Força Axial
```

```

sigma_B3 = max(FB3)/pi/De^2*4;
sigma_D2 = max(FD2)/pi/De^2*4;
sigma_D7 = max(FD7)/pi/De^2*4;
sigma_A3 = max(FA3)/pi/De^2*4;
sigma_B2 = max(FB2)/pi/De^2*4;
sigma_D1 = max(FD1)/pi/De^2*4;
sigma_D4 = max(FD4)/pi/De^2*4;
sigma_D5 = max(FD5)/pi/De^2*4;
sigma_D6 = max(FD6)/pi/De^2*4;

```

```
%dados recentes
```

```

tau_vet_rot = [tau_P29];
tau_vet = [tau_A3 tau_B2 tau_B3 tau_D1 tau_D2 tau_D4 tau_D5 tau_D6 tau_D7
tau_P21 tau_P22 tau_P23 tau_P25 tau_P26 tau_P27 tau_P28 tau_P30];

```

```
C_vet_rot = [CP29];
```

```

C_vet = [CA3 CB2 CB3 CD1 CD2 CD4 CD5 CD6 CD7 CP21 CP22 CP23 CP25 CP26 CP27
CP28 CP30];

```

```

tau_medio = mean(tau_vet)

F_vet_rot = [max(FP29)];
F_vet = [max(FA3) max(FB2) max(FB3) max(FD1) max(FD2) max(FD4) max(FD5)
max(FD6) max(FD7) max(FP21) max(FP22) max(FP23) max(FP25) ...
max(FP26) max(FP27) max(FP28) max(FP30)];

%% Interpolação

matrice = [C_vet',tau_vet',F_vet'];
matrice = sortrows(matrice);

p = polyfit(matrice(:,1),matrice(:,2),2);
tau_val = polyval(p,matrice(:,1));

p = polyfit(matrice(:,1),matrice(:,3),2);
F_val = polyval(p,matrice(:,1));

%% graficos

figure(3)
plot(tau_vet,'sr','MarkerFaceColor','r')
hold on
plot(F_vet,'ob','MarkerFaceColor','b')
plot(tau_vet_rot,'sr')
plot(F_vet_rot,'ob')
legend('\tau','Força','\tau rotti','Força ruptura','Location','NE')
xlabel('Amostras');ylabel('Tensão [MPa]');title('Tensão \tau medio
(clad/coat) [MPa]');

figure(4)
plot(C_vet,tau_vet,'sr','MarkerFaceColor','r')
hold on
plot(C_vet,F_vet,'ob','MarkerFaceColor','b')
plot(C_vet_rot,tau_vet_rot,'sr')
plot(C_vet_rot,F_vet_rot,'ob')
plot(matrice(:,1),tau_val,'--r')
plot(matrice(:,1),F_val,'--b')
legend('\tau','Força','\tau rotti','Força ruptura','Location','NE')
xlabel('profundidade da cavidade [mm]');ylabel('Tensão [MPa] / Força
[N]');title('Tensão \tau medio (clad/coat) [MPa]');

%% calculo do comprimento critico de englobamento

%Flc_vet = 20 %da FBGS
taulc_vet = [tau_A3 tau_B2 tau_D1 tau_D2 tau_D4 tau_D5 tau_D6 tau_D7];
L = mean(F_vet_rot)/pi/d^2*4*d/(2*tau_medio)

```

A.2 Script MATLAB – Identificação dos Sensores

```

% 13/03/2015
% cálculo da Posição do sensor FBG através da técnica do fio aquecido
clear all
close all
clc

%% LOAD

sensor1v24 = load ('2015_data\03\Sensors.v24_20150317152636.txt');
sensor2v24 = load ('2015_data\03\Sensors.v24_20150317153154.txt');
sensor3v24 = load ('2015_data\03\Sensors.v24_20150317153546.txt');
sensor4v24 = load ('2015_data\03\Sensors.v24_20150317161852.txt');
sensor5v24 = load ('2015_data\03\Sensors.v24_20150317162041.txt');
sensor6v24 = load ('2015_data\03\Sensors.v24_20150317162231.txt');
sensor1v24C = load ('2015_data\03\Sensors.v24C_20150317163943.txt');
sensor2v24C = load ('2015_data\03\Sensors.v24C_20150317164601.txt');
sensor3v24C = load ('2015_data\03\Sensors.v24C_20150317164757.txt');

sensor1v36 = load ('2015_data\03\Sensors.v36_20150317155615.txt');
sensor2v36 = load ('2015_data\03\Sensors.v36_20150317155843.txt');
sensor3v36 = load ('2015_data\03\Sensors.v36_20150317160123.txt');
sensor4v36 = load ('2015_data\03\Sensors.v36_20150317160403.txt');
sensor5v36 = load ('2015_data\03\Sensors.v36_20150317162515.txt');

sensor1v48 = load ('2015_data\03\Sensors.v48_20150317153934.txt');
sensor2v48 = load ('2015_data\03\Sensors.v48_20150317154324.txt');
sensor3v48 = load ('2015_data\03\Sensors.v48_20150317154513.txt');
sensor1v48C = load ('2015_data\03\Sensors.v48C_20150317165132.txt');
sensor2v48C = load ('2015_data\03\Sensors.v48C_20150317165248.txt');
sensor3v48C = load ('2015_data\03\Sensors.v48C_20150317165421.txt');

sensor1v64 = load ('2015_data\03\Sensors.v64_20150317160637.txt');
sensor2v64 = load ('2015_data\03\Sensors.v64_20150317160819.txt');
sensor3v64 = load ('2015_data\03\Sensors.v64_20150317160957.txt');

sensor1v80 = load ('2015_data\03\Sensors.v80_20150317161137.txt');
sensor2v80 = load ('2015_data\03\Sensors.v80_20150317161329.txt');
sensor3v80 = load ('2015_data\03\Sensors.v80_20150317161503.txt');
sensor4v80 = load ('2015_data\03\Sensors.v80_20150317161728.txt');

sensor1v96 = load ('2015_data\03\Sensors.v96_20150317154709.txt');
sensor2v96 = load ('2015_data\03\Sensors.v96_20150317154844.txt');
sensor3v96 = load ('2015_data\03\Sensors.v96_20150317155004.txt');

%% ID posição
close all
sensor1 = sensor2v48; load ('2015_data\03\Sensors.v24_20150317161852.txt');
sensor2 = sensor1v48C; load
('2015_data\03\Sensors.v24C_20150317164757.txt');

% Filtro do sinal
w = 0.05;
% Butterworth 10 poli
[s,r] = butter(10, w, 'low');
s1_0=sensor1(:,2);

```

```

sensor1(:,2) = filtfilt(s,r,sensor1(:,2));
sensor2(:,2) = filtfilt(s,r,sensor2(:,2));
sensor1(:,3) = filtfilt(s,r,sensor1(:,3));
sensor2(:,3) = filtfilt(s,r,sensor2(:,3));
sensor1(:,4) = filtfilt(s,r,sensor1(:,4));
sensor2(:,4) = filtfilt(s,r,sensor2(:,4));
sensor1(:,5) = filtfilt(s,r,sensor1(:,5));
sensor2(:,5) = filtfilt(s,r,sensor2(:,5));
% rr1=diff(sensor1(:,2));
% [m1,i1]=max(rr1);
% rr2=diff(255-sensor2(:,2));
% [m2,i2]=max(rr2);

```

figure(1)

```

p=plot(sensor1(:,1)*8,sensor1(:,2),'b','linewidth',2);grid on;hold on
plot([169 169],[1566.05 1566.45],'k--','linewidth',2)
p=plot(255-sensor2(:,1)*8,sensor2(:,2),'r','linewidth',2);grid on;
legend('ida','centro','retorno')
plot([165 165],[1566.05 1566.35],'k',[173 173],[1566.05
1566.35],'k','linewidth',2)
title('Ormocer');xlabel('s [mm]','fontsize',12);ylabel('\lambda
[nm]','fontsize',12)

```

figure(4)

```

p=plot(sensor1(:,1)*8,sensor1(:,3),'b','linewidth',2);grid on;hold on
plot([68.5 68.5],[1566.05 1566.45]+(+66-81.75),'k--','linewidth',2)
p=plot(255-sensor2(:,1)*8,sensor2(:,3),'r','linewidth',2);grid on;
legend('ida','centro','retorno')
plot([63.5 63.5],[1566.05 1566.35]+(+66-81.75),'k',[73.5 73.5],[1566.05
1566.35]+(+66-81.75),'k','linewidth',2)
title('Ormocer');xlabel('s [mm]','fontsize',12);ylabel('\lambda
[nm]','fontsize',12)

```

figure(2)

```

p=plot(sensor1(:,1)*8,sensor1(:,4),'b','linewidth',2);hold on
plot([90.5 90.5],[1564.9 1565.3],'k--','linewidth',2)
p=plot(255-sensor2(:,1)*8,sensor2(:,4),'r','linewidth',2);
legend('ida','centro','retorno')
plot([97 97],[1564.9 1565.2],'k',[84 84],[1564.9 1565.2],'k','linewidth',2)
title('Acrilato');grid on;xlabel('s [mm]','fontsize',12);ylabel('\lambda
[nm]','fontsize',12)

```

figure(3)

```

p=plot(sensor1(:,1)*8,sensor1(:,5),'b','linewidth',2);hold on
plot([93.8 93.8],[1579 1579.4],'k--','linewidth',2)
p=plot(255-sensor2(:,1)*8,sensor2(:,5),'r','linewidth',2);hold on
legend('ida','centro','retorno')
plot([98 98],[1579 1579.3],'k',[90 90],[1579 1579.3],'k','linewidth',2)
title('Immide');grid on;xlabel('s [mm]','fontsize',12);ylabel('\lambda
[nm]','fontsize',12)

```

figure(10)

```

p=plot(sensor1(:,1)*8,sensor1(:,2),'k','linewidth',2);grid on;hold on
%plot([169 169],[1566.05 1566.45],'k--','linewidth',2)
p=plot(255-sensor2(:,1)*8,sensor2(:,2),'k-','linewidth',2);grid on;
legend('ida','retorno')
%plot([165 165],[1566.05 1566.35],'k',[173 173],[1566.05
1566.35],'k','linewidth',2)
%title('Ormocer');xlabel('s [mm]','fontsize',12);ylabel('\lambda
[nm]','fontsize',12)

```

```

p=plot(sensor1(:,1)*8,sensor1(:,3)+66-81.75,'k','linewidth',2);grid on;hold
on
%plot([68.5 68.5],[1566.05 1566.45]-(+66-81.75),'k--','linewidth',2)
p=plot(255-sensor2(:,1)*8,sensor2(:,3)+66-81.75,'k-.','linewidth',2);grid
on;
%legend('ida','centro','retorno')
%plot([63.5 63.5],[1566.05 1566.35]-(+66-81.75),'k',[73.5 73.5],[1566.05
1566.35]-(+66-81.75),'k','linewidth',2)
%title('Ormocer');
xlabel('s [mm]','fontsize',12);ylabel('\lambda [nm]','fontsize',12)

figure(11)
p=plot(sensor1(:,1)*8,sensor1(:,5),'k','linewidth',2);hold on
%plot([93.8 93.8],[1579 1579.4],'k--','linewidth',2)
p=plot(255-sensor2(:,1)*8,sensor2(:,5),'k --','linewidth',2);hold on
legend('ida','retorno')
%plot([98 98],[1579 1579.3],'k',[90 90],[1579 1579.3],'k','linewidth',2)
%title('Immide');
grid on;xlabel('s [mm]','fontsize',12);ylabel('\lambda [nm]','fontsize',12)

figure(100)
p=plot(255-
sensor2(:,1)*8,sensor2(:,2),'k','linewidth',2);%,sensor1(:,1)*8,s1_0,'r','l
inewidth',2)

%% confronto das velocidades
close all
figure()
p=plot(sensor3v24(:,1)*4,sensor3v24(:,3),sensor4v36(:,1)*6,sensor4v36(:,3) .
..
,sensor1v64(:,1)*10.7,sensor1v64(:,3),sensor3v96(:,1)*16,sensor3v96(:,3));g
rid on;title('FBG1 O')
%
,sensor1v48(:,1)*8,sensor1v48(:,3),sensor1v64(:,1)*10.7,sensor1v64(:,3),sen
sor1v80(:,1)*13.3,sensor1v80(:,3)...

set(p,'linewidth',2);grid on;xlabel('s [mm]');ylabel('\lambda [nm]')

figure()
p=plot(sensor3v24(:,1)*4,sensor3v24(:,4),sensor4v36(:,1)*6,sensor4v36(:,4) .
..
,sensor1v64(:,1)*10.7,sensor1v64(:,4),sensor3v96(:,1)*16,sensor3v96(:,4))
%
,sensor1v48(:,1)*8,sensor1v48(:,4),sensor1v64(:,1)*10.7,sensor1v64(:,4),sen
sor1v80(:,1)*13.3,sensor1v80(:,4)...
;grid on;title('FBG3 A');grid on;xlabel('s [mm]');ylabel('\lambda [nm]')
set(p,'linewidth',2)

figure()
p=plot(sensor3v24(:,1)*4,sensor3v24(:,5),sensor4v36(:,1)*6,sensor4v36(:,5) .
..
,sensor1v64(:,1)*10.7,sensor1v64(:,5),sensor3v96(:,1)*16,sensor3v96(:,5))

%,sensor1v48(:,1)*8,sensor1v48(:,5),sensor1v64(:,1)*10.7,sensor1v64(:,5),se
nsor1v80(:,1)*13.3,sensor1v80(:,5)...

```

```

        ;grid on;title('FBG4 I');grid on;xlabel('s [mm]');ylabel('\lambda
[nm]')
set(p,'linewidth',2)

%% confronto alturas chapa de aluminio
close all
sensorNEW1 = sensor3v24;
sensorOLD1 = load ('2015_data\03\Sensors.20150313131034.txt');
sensorOLD2 = load ('2015_data\03\Sensors.20150313130003.txt');
sensorNEW = sensor5v24;
figure()
plot(sensorNEW1(:,1)*4,sensorNEW1(:,3),'b',sensorOLD1(:,1)*4,sensorOLD1(:,3)
),'r','linewidth',2);grid on;hold on
legend('altura 1mm','altura 0mm')
plot(sensorNEW(:,1)*4,sensorNEW(:,3),'b','linewidth',2);hold on
plot(sensorOLD2(:,1)*4,sensorOLD2(:,3),'r','linewidth',2);xlabel('s
[mm]','fontsize',12);ylabel('\lambda [nm]','fontsize',12)
figure()
plot(sensorNEW1(:,1)*4,sensorNEW1(:,2),'b',sensorOLD1(:,1)*4,sensorOLD1(:,2)
),'r','linewidth',2);grid on;hold on
legend('altura 1mm','altura 0mm')
plot(sensorNEW(:,1)*4,sensorNEW(:,2),'b','linewidth',2);hold on
plot(sensorOLD2(:,1)*4,sensorOLD2(:,2),'r','linewidth',2);xlabel('s
[mm]','fontsize',12);ylabel('\lambda [nm]','fontsize',12)
figure()
plot(sensorNEW1(:,1)*4,sensorNEW1(:,4),'b',sensorOLD1(:,1)*4,sensorOLD1(:,4)
),'r','linewidth',2);grid on;hold on
legend('altura 1mm','altura 0mm')
plot(sensorNEW(:,1)*4,sensorNEW(:,4),'b','linewidth',2);hold on
plot(sensorOLD2(:,1)*4,sensorOLD2(:,4),'r','linewidth',2);xlabel('s
[mm]','fontsize',12);ylabel('\lambda [nm]','fontsize',12)
figure()
plot(sensorNEW1(:,1)*4,sensorNEW1(:,5),'b',sensorOLD1(:,1)*4,sensorOLD1(:,5)
),'r','linewidth',2);grid on;hold on
legend('altura 1mm','altura 0mm')
plot(sensorNEW(:,1)*4,sensorNEW(:,5),'b','linewidth',2);hold on
plot(sensorOLD2(:,1)*4,sensorOLD2(:,5),'r','linewidth',2);xlabel('s
[mm]','fontsize',12);ylabel('\lambda [nm]','fontsize',12)

%% confronto a mesma velocidade
close all
% m = [0.8000      0      1.0000;
%      0      0.5000      0;
%      1.0000      0      0;
%      0      0.7500      0.7500;
%      0.7500      0      0.7500;
%      0.7500      0.7500      0;
%      0.2500      0.2500      0.2500]
%set(gca,'ColorOrder',m)
figure()
p=plot(sensor1v24(:,1)*4,sensor1v24(:,2),sensor5v24(:,1)*4,sensor5v24(:,2),
sensor3v24(:,1)*4,sensor3v24(:,2))
%,sensor4v24(:,1)*4,sensor4v24(:,2)...
%
,sensor5v24(:,1)*4,sensor5v24(:,2),sensor6v24(:,1)*4,sensor6v24(:,2));grid
on; hold on,legend;

```



```

title('Ormocer V_{scan} : 4 mm/s','fontweight','bold');xlabel('s
[mm]','fontsize',12);ylabel('\lambda [nm]','fontsize',12);grid on
legend('set 1','set 2','set 3')
set(p,'linewidth',2),%set(gca,'fontweight','bold')
figure()
p=plot(sensor1v24(:,1)*4,sensor1v24(:,3),sensor5v24(:,1)*4,sensor5v24(:,3),
sensor3v24(:,1)*4,sensor3v24(:,3))
%,sensor4v24(:,1)*4,sensor4v24(:,3)...
%
,sensor5v24(:,1)*4,sensor5v24(:,3),sensor6v24(:,1)*4,sensor6v24(:,3));grid
on;legend
title('Ormocer V_{scan} : 4 mm/s');grid on;xlabel('s
[mm]','fontsize',12);ylabel('\lambda [nm]','fontsize',12)
set(p,'linewidth',2);legend('set 1','set 2','set 3')
figure()
p=plot(sensor1v24C(:,1)*4,sensor1v24C(:,3),sensor2v24C(:,1)*4,sensor2v24C(
:,3),sensor3v24C(:,1)*4,sensor3v24C(:,3));
grid on;xlabel('s [mm]','fontsize',12);ylabel('\lambda [nm]','fontsize',12)
title('Ormocer V_{scan} : 4 mm/s C');
set(p,'linewidth',2);legend('set 1','set 2','set 3')
% figure()
%
p=plot(sensor1v36(:,1)*6,sensor1v36(:,3),sensor2v36(:,1)*6,sensor2v36(:,3),
sensor3v36(:,1)*6,sensor3v36(:,3),sensor4v36(:,1)*6,sensor4v36(:,3)...
%,sensor5v36(:,1)*6,sensor5v36(:,3));grid on; hold on; legend
% title('Ormocer Coating V_{scan} = 6 mm/s');set(p,'linewidth',2)

figure()
p=plot(sensor1v48(:,1)*8,sensor1v48(:,3),sensor2v48(:,1)*8,sensor2v48(:,3),
sensor3v48(:,1)*8,sensor3v48(:,3));grid on;
title('Ormocer V_{scan} : 8 mm/s');grid on;set(p,'linewidth',2);xlabel('s
[mm]','fontsize',12);ylabel('\lambda [nm]','fontsize',12)
legend('set 1','set 2','set 3')
figure()
p=plot(sensor1v48C(:,1)*8,sensor1v48C(:,3),sensor2v48C(:,1)*8,sensor2v48C(
:,3),sensor3v48C(:,1)*8,sensor3v48C(:,3));grid on;
title('Ormocer V_{scan} : 8 mm/s C');grid on;set(p,'linewidth',2);xlabel('s
[mm]','fontsize',12);ylabel('\lambda [nm]','fontsize',12)
legend('set 1','set 2','set 3')
% figure()
%
p=plot(sensor1v64(:,1)*10.7,sensor1v64(:,3),sensor2v64(:,1)*10.7,sensor2v64
(:,3),sensor3v64(:,1)*10.7,sensor3v64(:,3));grid on;legend
% title('Ormocer Coating V_{scan} = 10.7 mm/s');grid
on;set(p,'linewidth',2)

figure()
p=plot(sensor1v80(:,1)*13.3,sensor1v80(:,3),sensor2v80(:,1)*13.3,sensor2v80
(:,3),sensor3v80(:,1)*13.3,sensor3v80(:,3));grid on;
title('Ormocer V_{scan} : 13.3 mm/s');grid
on;set(p,'linewidth',2);xlabel('s [mm]','fontsize',12);ylabel('\lambda
[nm]','fontsize',12)
get(gca,'ColorOrder');legend('set 1','set 2','set 3')
figure()
p=plot(sensor1v96(:,1)*16,sensor1v96(:,3),sensor2v96(:,1)*16,sensor2v96(:,3
),sensor3v96(:,1)*16,sensor3v96(:,3));grid on;
title('Ormocer V_{scan} : 16 mm/s');grid on;set(p,'linewidth',2);xlabel('s
[mm]','fontsize',12);ylabel('\lambda [nm]','fontsize',12)
legend('set 1','set 2','set 3');%set(gca,'fontsize',12)
%-- acrilato

```

```

figure()
p=plot(sensor1v24(:,1)*4,sensor1v24(:,4),sensor5v24(:,1)*4,sensor5v24(:,4),
sensor3v24(:,1)*4,sensor3v24(:,4))
%,sensor4v24(:,1)*4,sensor4v24(:,4)...
%
%,sensor5v24(:,1)*4,sensor5v24(:,4),sensor6v24(:,1)*4,sensor6v24(:,4));grid
on;
title('Acrilato V_{scan} : 4 mm/s');set(p,'linewidth',2);grid on;xlabel('s
[mm]','fontsize',12);ylabel('\lambda [nm]','fontsize',12)
legend('set 1','set 2','set 3')

figure()
p=plot(sensor1v24C(:,1)*4,sensor1v24C(:,4),sensor2v24C(:,1)*4,sensor2v24C(
:,4),sensor3v24C(:,1)*4,sensor3v24C(:,4));
grid on;xlabel('s [mm]','fontsize',12);ylabel('\lambda [nm]','fontsize',12)
title('Acrilato V_{scan} : 4 mm/s C');set(p,'linewidth',2);legend('set
1','set 2','set 3')

% figure()
%
p=plot(sensor1v36(:,1)*6,sensor1v36(:,4),sensor2v36(:,1)*6,sensor2v36(:,4),
sensor3v36(:,1)*6,sensor3v36(:,4),sensor4v36(:,1)*6,sensor4v36(:,4)...
%,sensor5v36(:,1)*6,sensor5v36(:,4));grid on; hold on,legend
% title('Acrilato Coating V_{scan} = 6 mm/s');set(p,'linewidth',2)

figure()
p=plot(sensor1v48(:,1)*8,sensor1v48(:,4),sensor2v48(:,1)*8,sensor2v48(:,4),
sensor3v48(:,1)*8,sensor3v48(:,4));grid on;
title('Acrilato V_{scan} : 8 mm/s');grid on;set(p,'linewidth',2);xlabel('s
[mm]','fontsize',12);ylabel('\lambda [nm]','fontsize',12)
legend('set 1','set 2','set 3')

figure()
p=plot(sensor1v48C(:,1)*8,sensor1v48C(:,4),sensor2v48C(:,1)*8,sensor2v48C(
:,4),sensor3v48C(:,1)*8,sensor3v48C(:,4));grid on;
title('Acrilato V_{scan} : 8 mm/s C');grid
on;set(p,'linewidth',2);xlabel('s [mm]','fontsize',12);ylabel('\lambda
[nm]','fontsize',12)
legend('set 1','set 2','set 3')
% figure()
%
p=plot(sensor1v64(:,1)*10.7,sensor1v64(:,4),sensor2v64(:,1)*10.7,sensor2v64
(:,4),sensor3v64(:,1)*10.7,sensor3v64(:,4));grid on;legend
% title('Acrilato Coating V_{scan} = 10.7 mm/s');grid
on;set(p,'linewidth',2)

figure()
p=plot(sensor1v80(:,1)*13.3,sensor1v80(:,4),sensor2v80(:,1)*13.3,sensor2v80
(:,4),sensor3v80(:,1)*13.3,sensor3v80(:,4));grid on;
title('Acrilato V_{scan} : 13.3 mm/s');grid
on;set(p,'linewidth',2);xlabel('s [mm]','fontsize',12);ylabel('\lambda
[nm]','fontsize',12)
legend('set 1','set 2','set 3')

figure()
p=plot(sensor1v96(:,1)*16,sensor1v96(:,4),sensor2v96(:,1)*16,sensor2v96(:,4)
),sensor3v96(:,1)*16,sensor3v96(:,4));grid on;
title('Acrilato V_{scan} : 16 mm/s');grid on;set(p,'linewidth',2);xlabel('s
[mm]','fontsize',12);ylabel('\lambda [nm]','fontsize',12)

```

```

legend('set 1','set 2','set 3')
%-- immide
figure()
p=plot(sensor1v24(:,1)*4,sensor1v24(:,5),sensor5v24(:,1)*4,sensor5v24(:,5),
sensor3v24(:,1)*4,sensor3v24(:,5))
%,sensor4v24(:,1)*4,sensor4v24(:,5)...
%
%,sensor5v24(:,1)*4,sensor5v24(:,5),sensor6v24(:,1)*4,sensor6v24(:,5));grid
on;legend
title('Immide V_{scan} : 4 mm/s');set(p,'linewidth',2);grid on;xlabel('s
[mm]','fontsize',12);ylabel('\lambda [nm]','fontsize',12)
figure()
p=plot(sensor1v24C(:,1)*4,sensor1v24C(:,5),sensor2v24C(:,1)*4,sensor2v24C(
:,5),sensor3v24C(:,1)*4,sensor3v24C(:,5));
grid on;
title('Immide V_{scan} : 4 mm/s C');set(p,'linewidth',2);xlabel('s
[mm]','fontsize',12);ylabel('\lambda [nm]','fontsize',12)

% figure()
%
p=plot(sensor1v36(:,1)*6,sensor1v36(:,5),sensor2v36(:,1)*6,sensor2v36(:,5),
sensor3v36(:,1)*6,sensor3v36(:,5),sensor4v36(:,1)*6,sensor4v36(:,5)...
%,sensor5v36(:,1)*6,sensor5v36(:,5));grid on; hold on,legend
% title('Immide Coating V_{scan} = 6 mm/s');set(p,'linewidth',2)

figure()
p=plot(sensor1v48(:,1)*8,sensor1v48(:,5),sensor2v48(:,1)*8,sensor2v48(:,5),
sensor3v48(:,1)*8,sensor3v48(:,5));grid on;
title('Immide V_{scan} : 8 mm/s');grid on;set(p,'linewidth',2);xlabel('s
[mm]','fontsize',12);ylabel('\lambda [nm]','fontsize',12)
figure()
p=plot(sensor1v48C(:,1)*8,sensor1v48C(:,5),sensor2v48C(:,1)*8,sensor2v48C(
:,5),sensor3v48C(:,1)*8,sensor3v48C(:,5));grid on;
title('Immide V_{scan} : 8 mm/s C');grid on;set(p,'linewidth',2);xlabel('s
[mm]','fontsize',12);ylabel('\lambda [nm]','fontsize',12)

% figure()
%
p=plot(sensor1v64(:,1)*10.7,sensor1v64(:,5),sensor2v64(:,1)*10.7,sensor2v64
(:,5),sensor3v64(:,1)*10.7,sensor3v64(:,5));grid on;legend
% title('Immide Coating V_{scan} = 10.7 mm/s');grid on;set(p,'linewidth',2)

figure()
p=plot(sensor1v80(:,1)*13.3,sensor1v80(:,5),sensor2v80(:,1)*13.3,sensor2v80
(:,5),sensor3v80(:,1)*13.3,sensor3v80(:,5));grid on;
title('Immide V_{scan} : 13.3 mm/s');grid on;set(p,'linewidth',2);xlabel('s
[mm]','fontsize',12);ylabel('\lambda [nm]','fontsize',12)

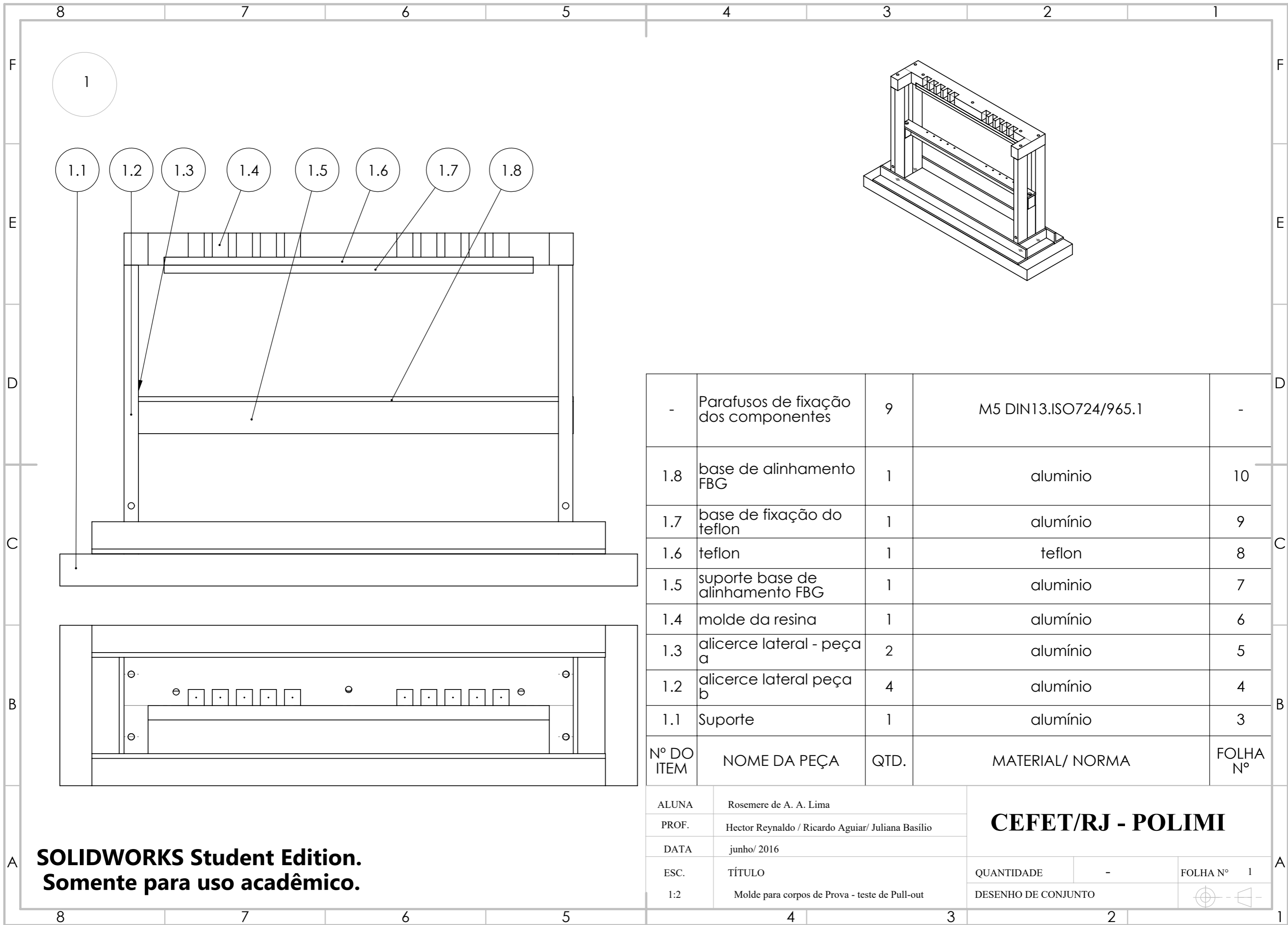
figure()
p=plot(sensor1v96(:,1)*16,sensor1v96(:,5),sensor2v96(:,1)*16,sensor2v96(:,5)
),sensor3v96(:,1)*16,sensor3v96(:,5));grid on;
title('Immide V_{scan} : 16 mm/s');grid on;set(p,'linewidth',2);xlabel('s
[mm]','fontsize',12);ylabel('\lambda [nm]','fontsize',12)
%%

```

ANEXOS

Desenhos Técnicos dos Moldes Projetados

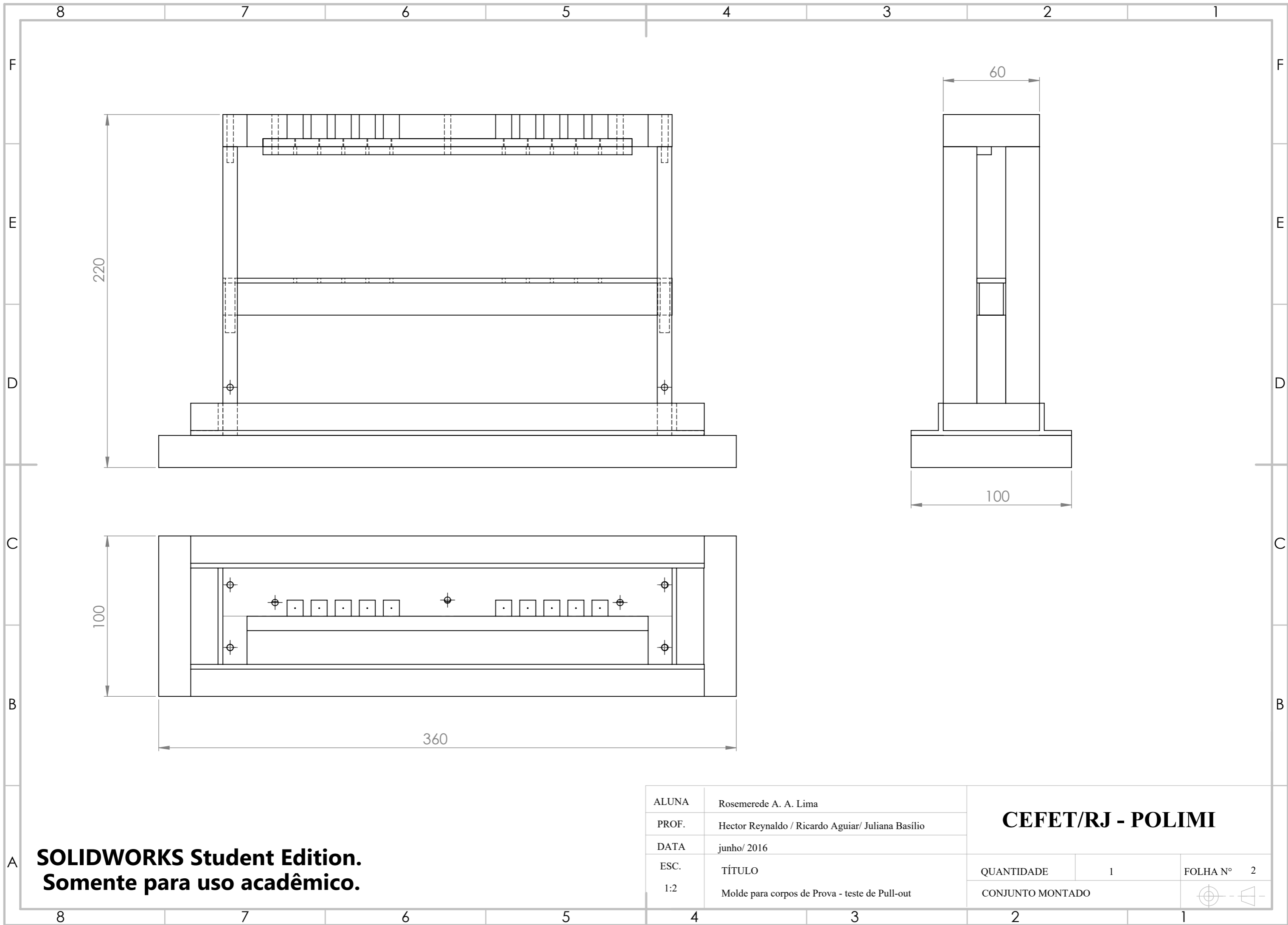
Nas páginas a seguir seguem os desenhos técnicos do molde para fabricação dos corpos de prova do Teste de Pull-out e de produção de laminados com sensores FBG englobados.



-	Parafusos de fixação dos componentes	9	M5 DIN13.ISO724/965.1	-
1.8	base de alinhamento FBG	1	alumínio	10
1.7	base de fixação do teflon	1	alumínio	9
1.6	teflon	1	teflon	8
1.5	suporte base de alinhamento FBG	1	alumínio	7
1.4	molde da resina	1	alumínio	6
1.3	alicerce lateral - peça a	2	alumínio	5
1.2	alicerce lateral peça b	4	alumínio	4
1.1	Suporte	1	alumínio	3
Nº DO ITEM	NOME DA PEÇA	QTD.	MATERIAL/ NORMA	FOLHA Nº

ALUNA	Rosemere de A. A. Lima	CEFET/RJ - POLIMI			
PROF.	Hector Reynaldo / Ricardo Aguiar/ Juliana Basilio				
DATA	junho/ 2016				
ESC.	TÍTULO	QUANTIDADE	-	FOLHA Nº	1
1:2	Molde para corpos de Prova - teste de Pull-out	DESENHO DE CONJUNTO			

**SOLIDWORKS Student Edition.
Somente para uso acadêmico.**

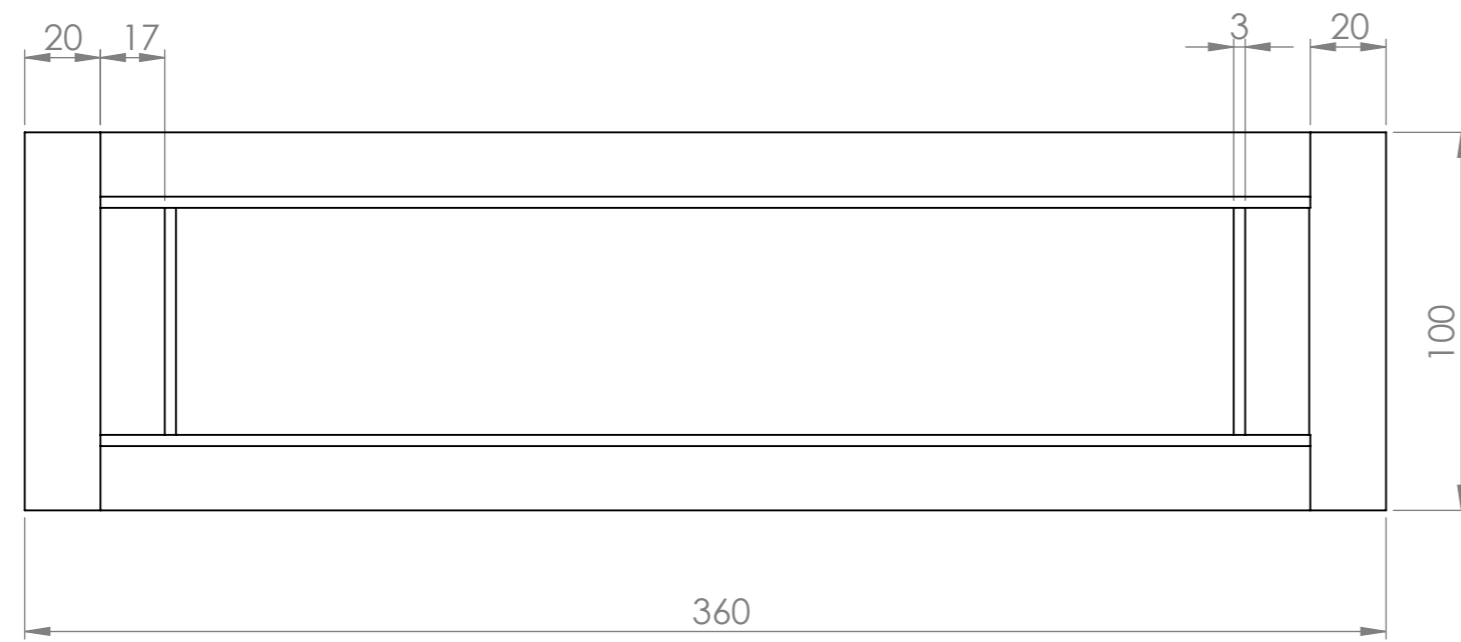
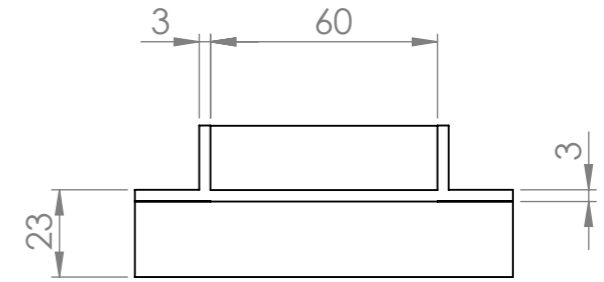
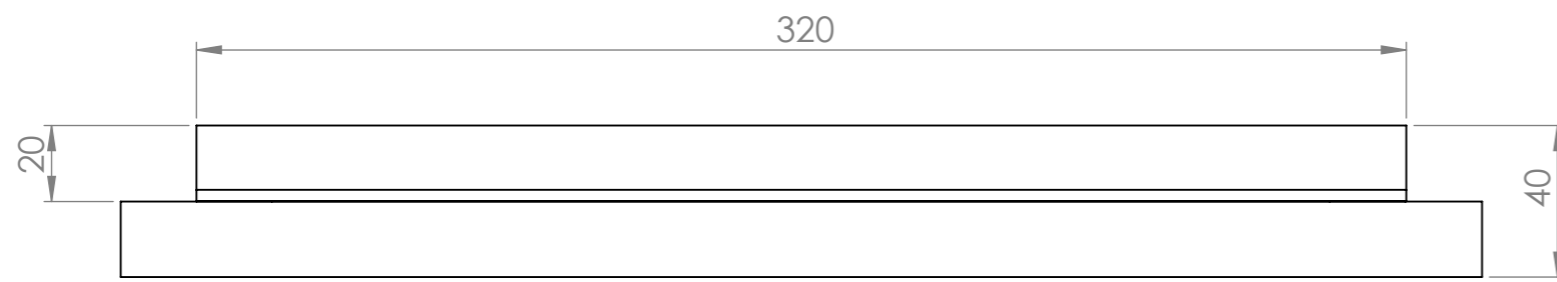


ALUNA	Rosemerede A. A. Lima
PROF.	Hector Reynaldo / Ricardo Aguiar/ Juliana Basilio
DATA	junho/ 2016
ESC.	TÍTULO
1:2	Molde para corpos de Prova - teste de Pull-out

CEFET/RJ - POLIMI		
QUANTIDADE	1	FOLHA Nº 2
CONJUNTO MONTADO		

**SOLIDWORKS Student Edition.
Somente para uso acadêmico.**

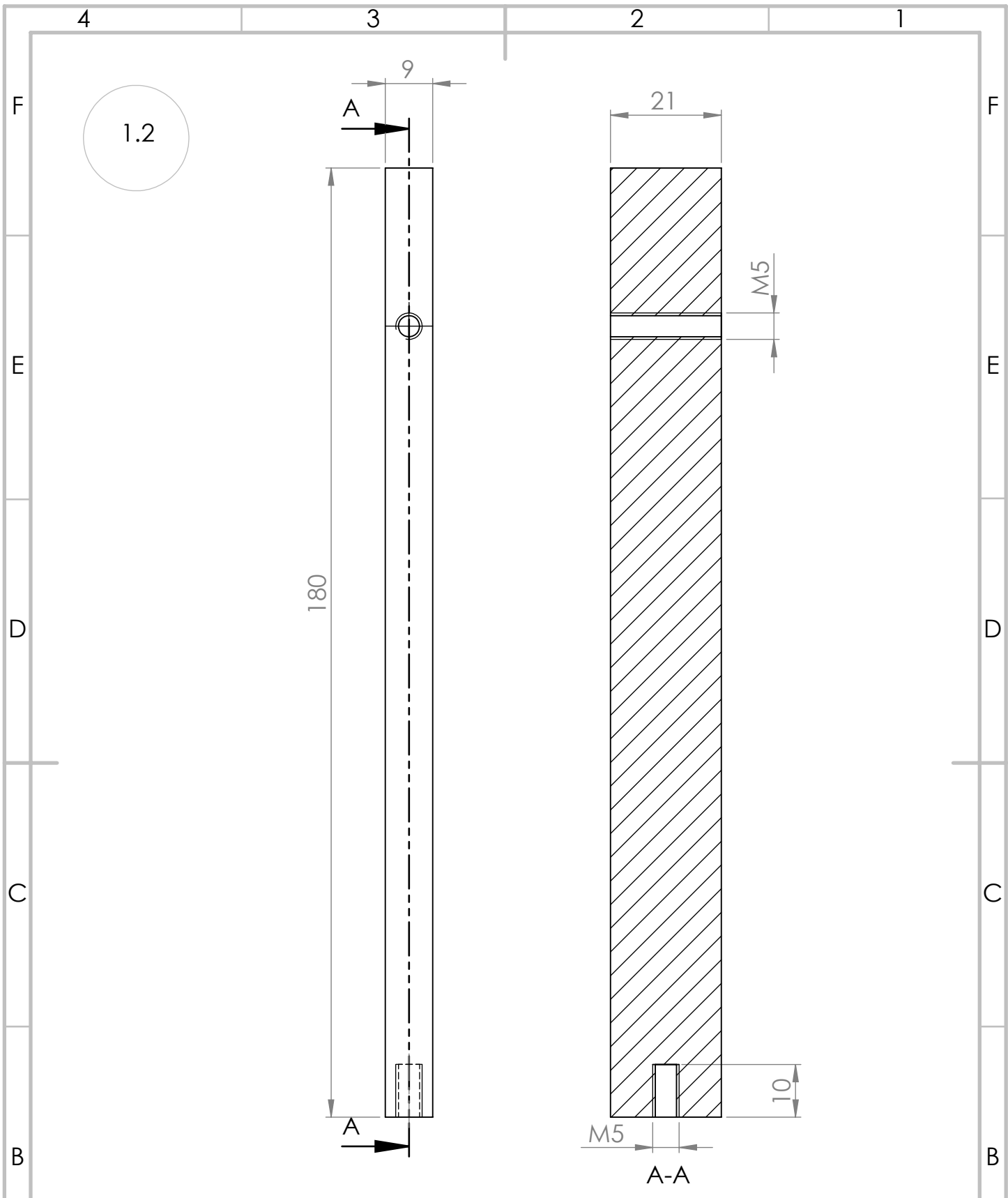
1.1



1.1	Suporte	1	alumínio
Nº DO ITEM	NOME DA PEÇA	QTD.	Material/Norma
ALUNA	Rosemere de A. A. Lima	CEFET/RJ - POLIMI	
PROF.	Hector Reynaldo / Ricardo Aguiar/ Juliana Basilio		
DATA	junho/ 2016		
ESC.	TÍTULO	QUANTIDADE	1
1:2	Molde para corpos de Prova - teste de Pull-out	SUPORTE	FOLHA Nº 3

**SOLIDWORKS Student Edition.
Somente para uso acadêmico.**





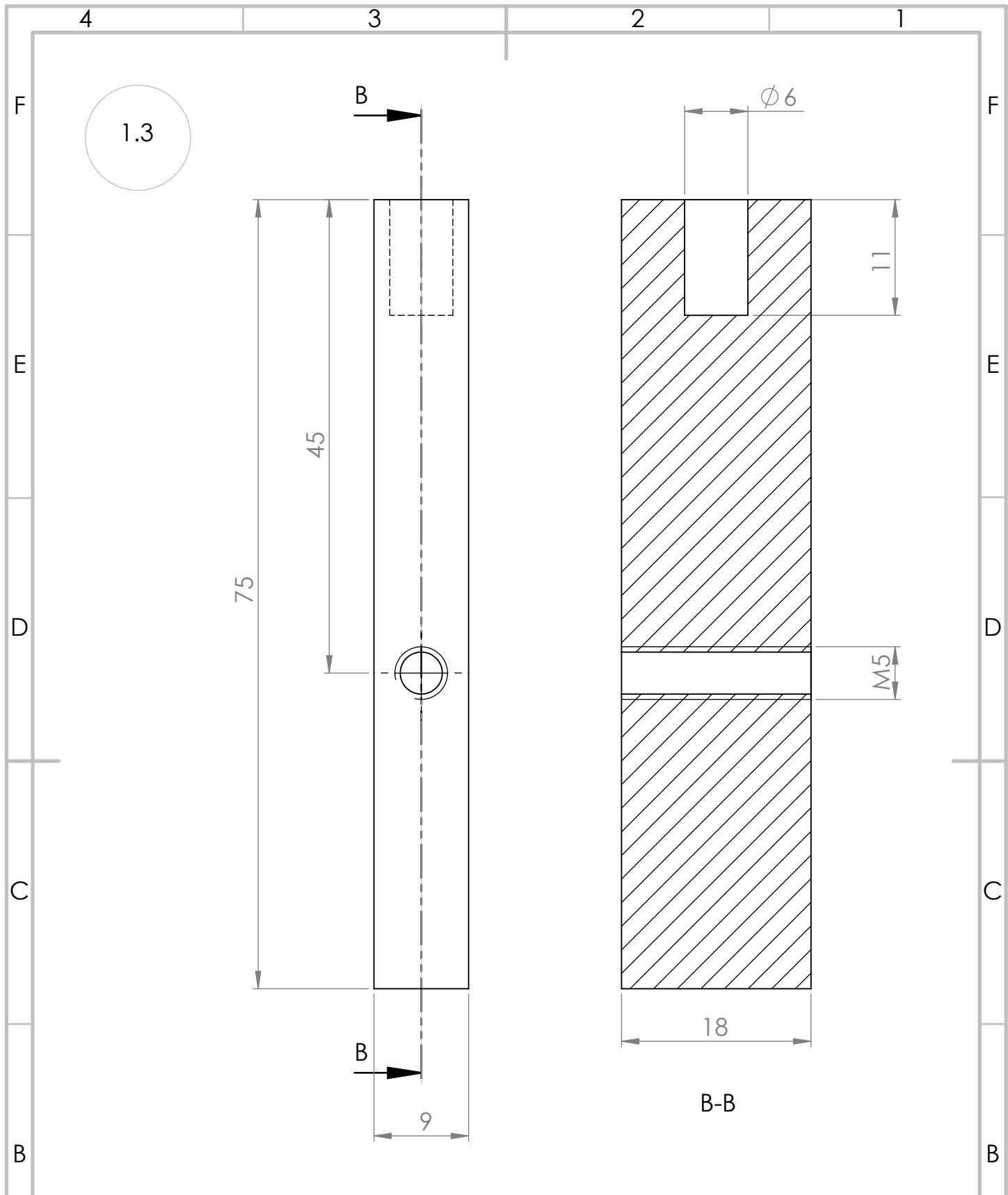
1.2	alicerce lateral peça b	4	alumínio
Nº DO ITEM	NOME DA PEÇA	QTD.	MATERIAL /NORMA
ALUNA	Rosemere de A. A. Lima	CEFET/RJ - POLIMI	
PROF.	Hector Reynaldo / Ricardo Aguiar/ Juliana Basílio		
DATA	junho/ 2016	ESC.	1:1
SOLIDWORKS Student Edition. Somente para uso acadêmico.	TÍTULO	Molde para corpos de Prova - teste de Pull-out	
	QUANTIDADE	4	FOLHA Nº 4
	ALICERCE LATERAL - PARTE b		

4

3

2

1



1.3	alicerce lateral - peça a	2	alumínio
-----	---------------------------	---	----------

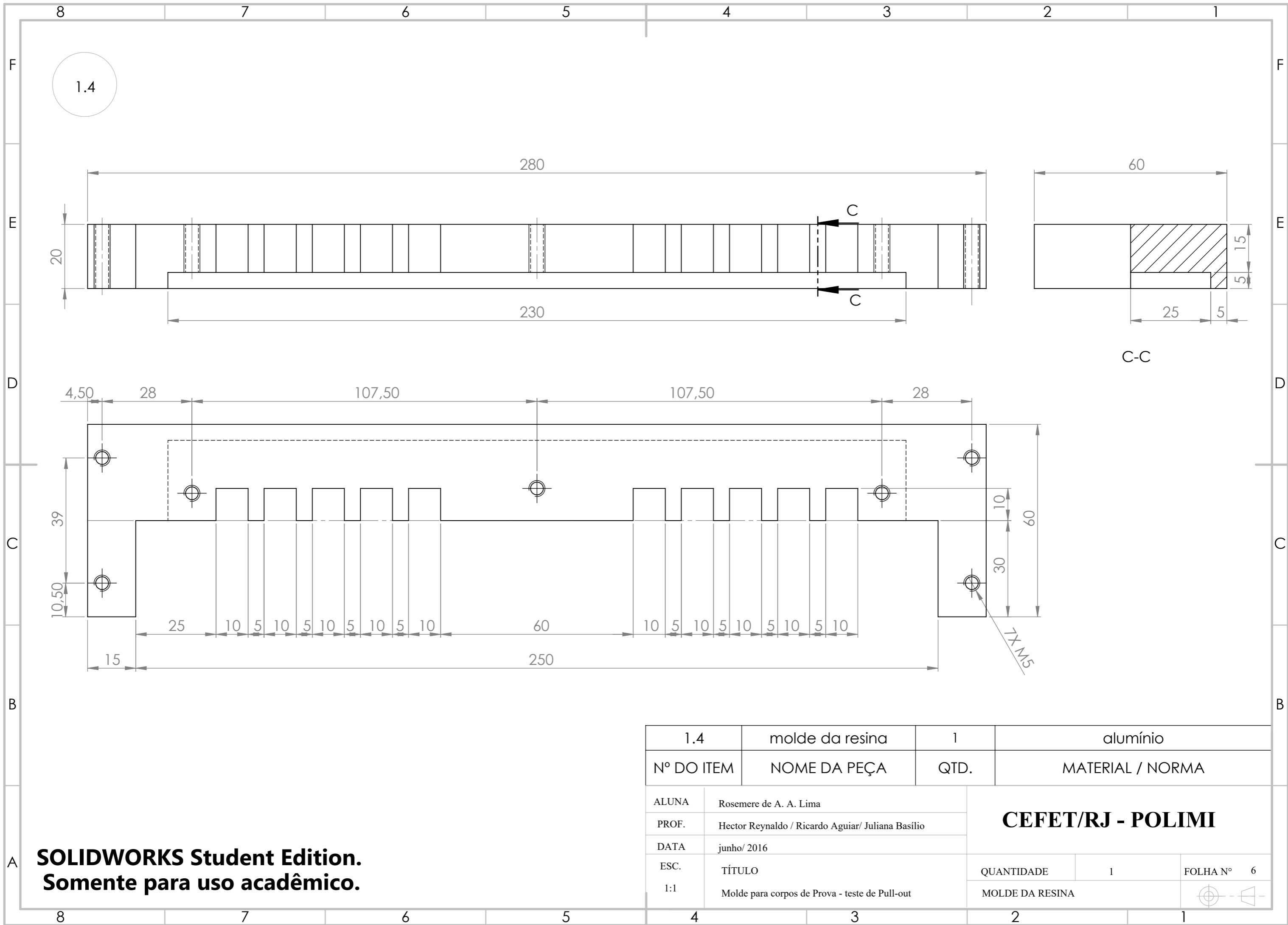
Nº DO ITEM	NOME DA PEÇA	QTD.	MATERIAL/NORMA
------------	--------------	------	----------------

ALUNA	Rosemere de A. A. Lima		
PROF.	Hector Reynaldo / Ricardo Aguiar/ Juliana Basílio		
DATA	junho/ 2016	ESC.	2:1

CEFET/RJ - POLIMI	
TÍTULO	Molde para corpos de Prova - teste de Pull-out
QUANTIDADE	2
FOLHA Nº	5

SOLIDWORKS Student Edition.
Somente para uso acadêmico.

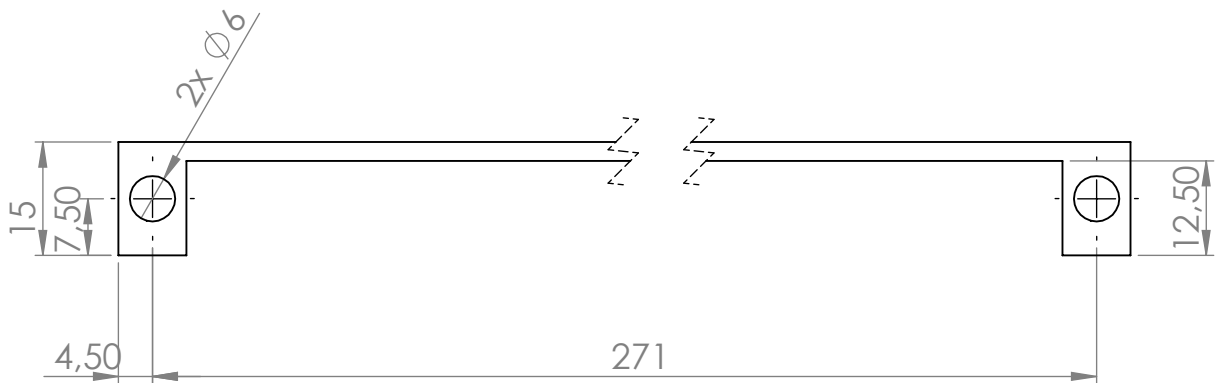
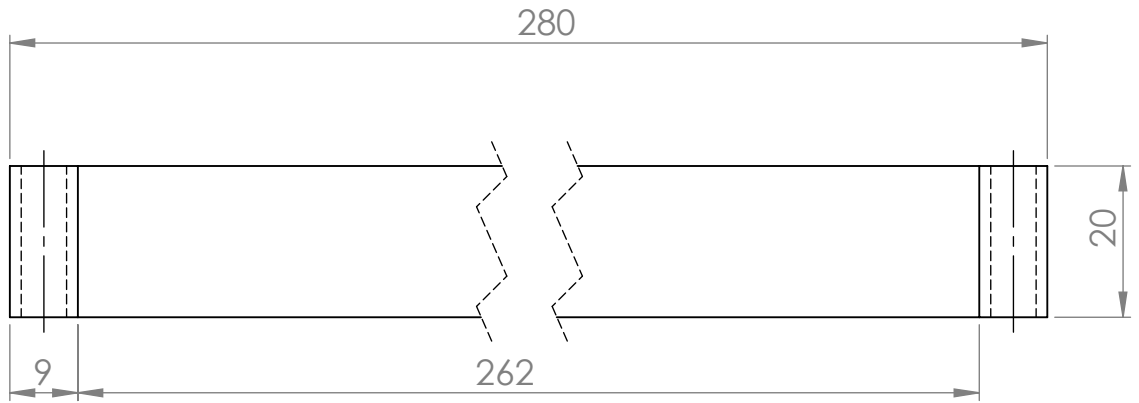
ALICERCE LATERAL - PARTE a	
----------------------------	--



1.4	molde da resina	1	alumínio	
Nº DO ITEM	NOME DA PEÇA	QTD.	MATERIAL / NORMA	
ALUNA	Rosemere de A. A. Lima		CEFET/RJ - POLIMI	
PROF.	Hector Reynaldo / Ricardo Aguiar/ Juliana Basilio			
DATA	junho/ 2016			
ESC.	TÍTULO	QUANTIDADE	1	FOLHA Nº 6
1:1	Molde para corpos de Prova - teste de Pull-out	MOLDE DA RESINA		

**SOLIDWORKS Student Edition.
Somente para uso acadêmico.**

1.5



1.5	suporte base de alinhamento FBG	1	alumínio			
Nº DO ITEM	NOME DA PEÇA	QTD.	MATERIAL / NORMA			
ALUNA	Rosemere de A. A. Lima	CEFET/RJ - POLIMI				
PROF.	Hector Reynaldo / Ricardo Aguiar/ Juliana Basílio					
DATA	junho/ 2016	ESC.	1:1			
A	SOLIDWORKS Student Edition. Somente para uso acadêmico.		TÍTULO	Molde para corpos de Prova - teste de Pull-out		
			QUANTIDADE	1	FOLHA Nº	7
			SUPORTE ALINHAMENTO FBG			

8 7 6 5 4 3 2 1

F F

E E

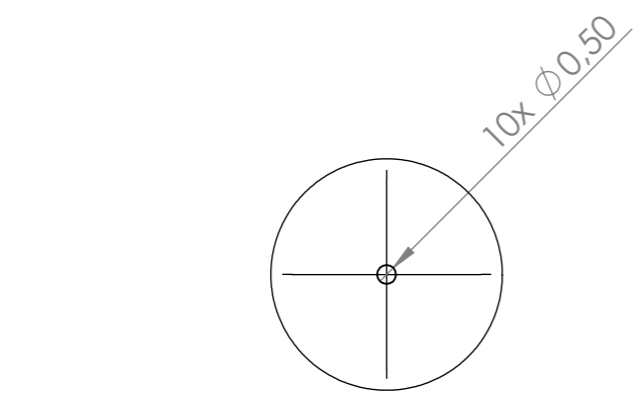
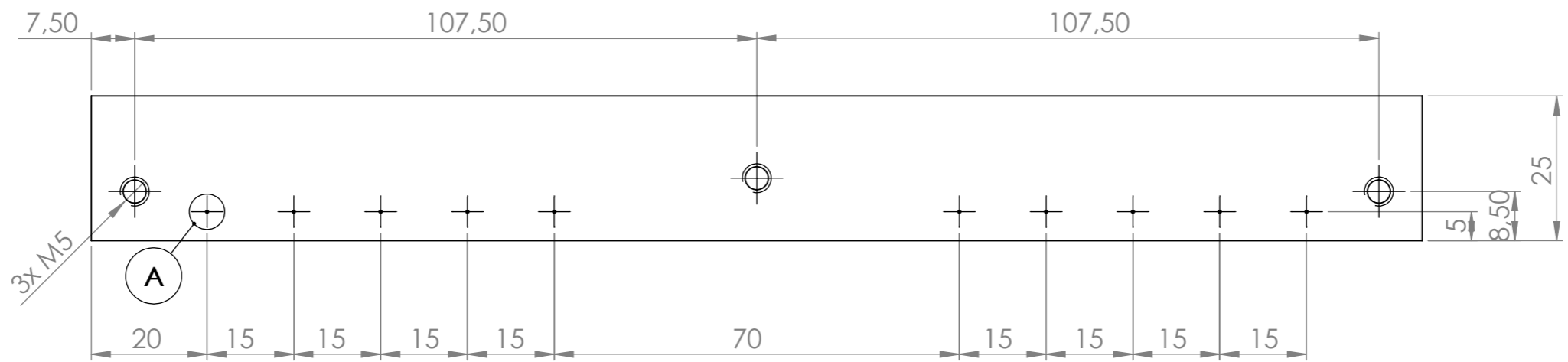
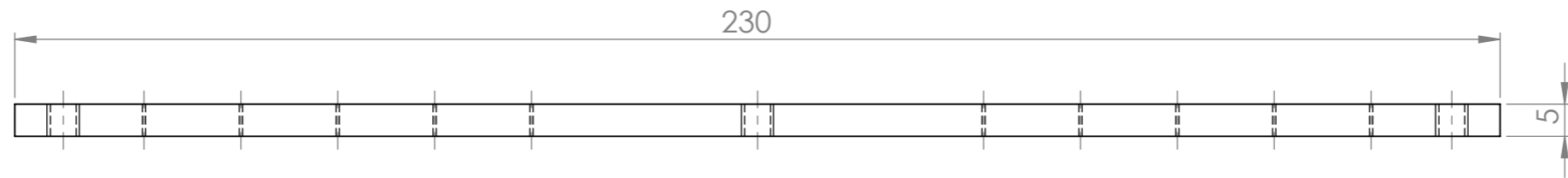
D D

C C

B B

A A

1.6



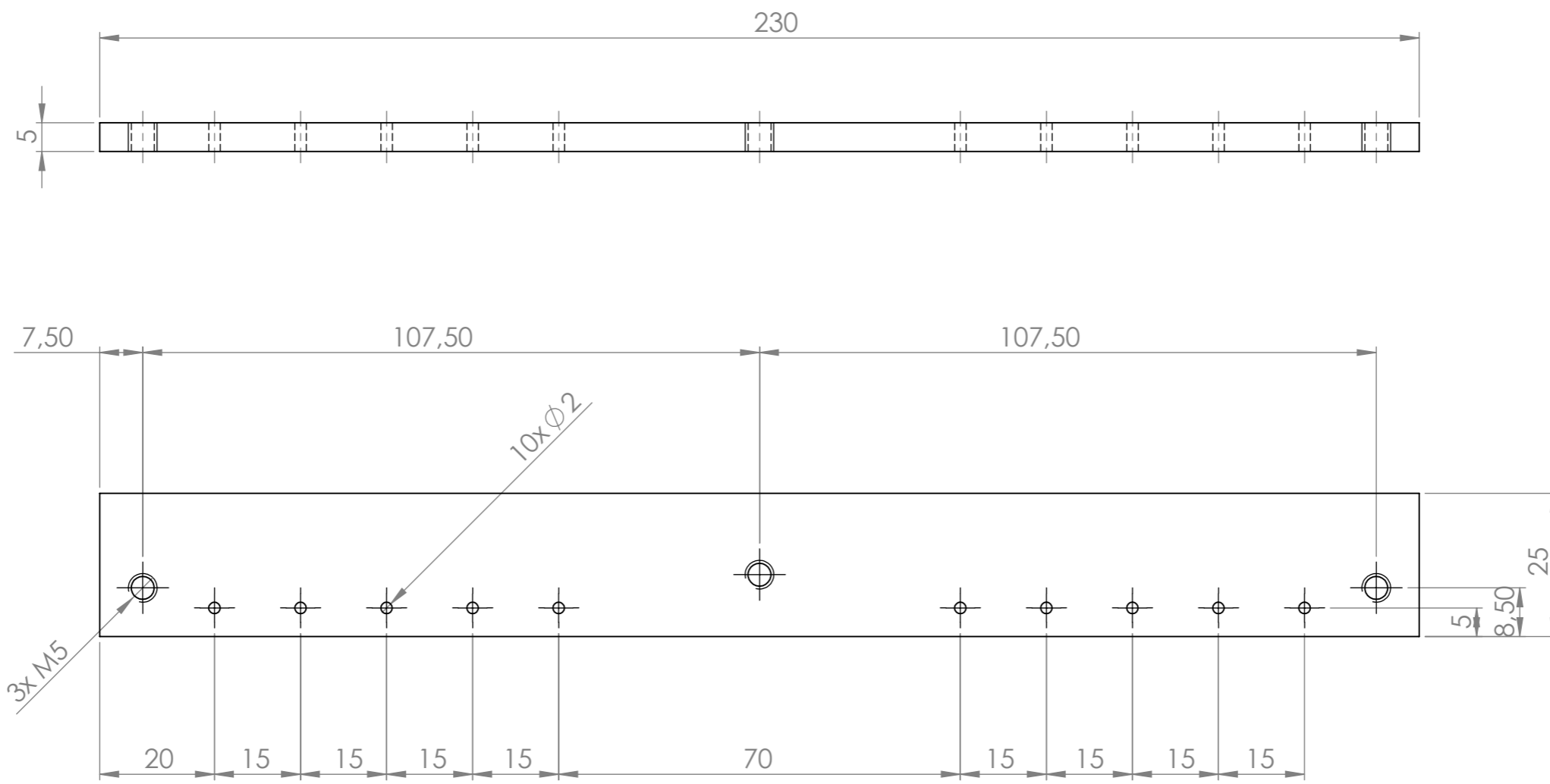
DETALHE A
ESCALA 5 : 1

1.6	teflon	1	teflon	
Nº DO ITEM	NOME DA PEÇA	QTD.	MATERIAL / NORMA	
ALUNA	Rosemere de A. A. Lima		CEFET/RJ - POLIMI	
PROF.	Hector Reynaldo / Ricardo Aguiar/ Juliana Basilio			
DATA	junho/ 2016			
ESC.	TÍTULO	QUANTIDADE	1	FOLHA Nº 8
1:1	Molde para corpos de Prova - teste de Pull-out	TEFLON		

SOLIDWORKS Student Edition.
Somente para uso acadêmico.

8 7 6 5 4 3 2 1

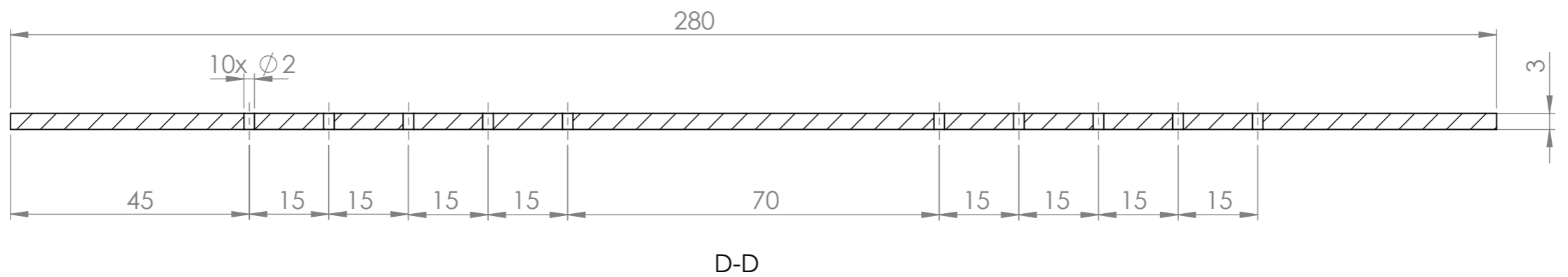
1.7



1.7	base de fixação do teflon	1	alumínio	
Nº DO ITEM	NOME DA PEÇA	QTD.	MATERIAL / NORMA	
ALUNA	Rosemere de A. A. Lima		CEFET/RJ - POLIMI	
PROF.	Hector Reynaldo / Ricardo Aguiar/ Juliana Basilio			
DATA	junho/ 2016			
ESC.	TÍTULO	QUANTIDADE	1	FOLHA Nº 9
1:1	Molde para corpos de Prova - teste de Pull-out	BASE DE FIXAÇÃO DO TEFLON		

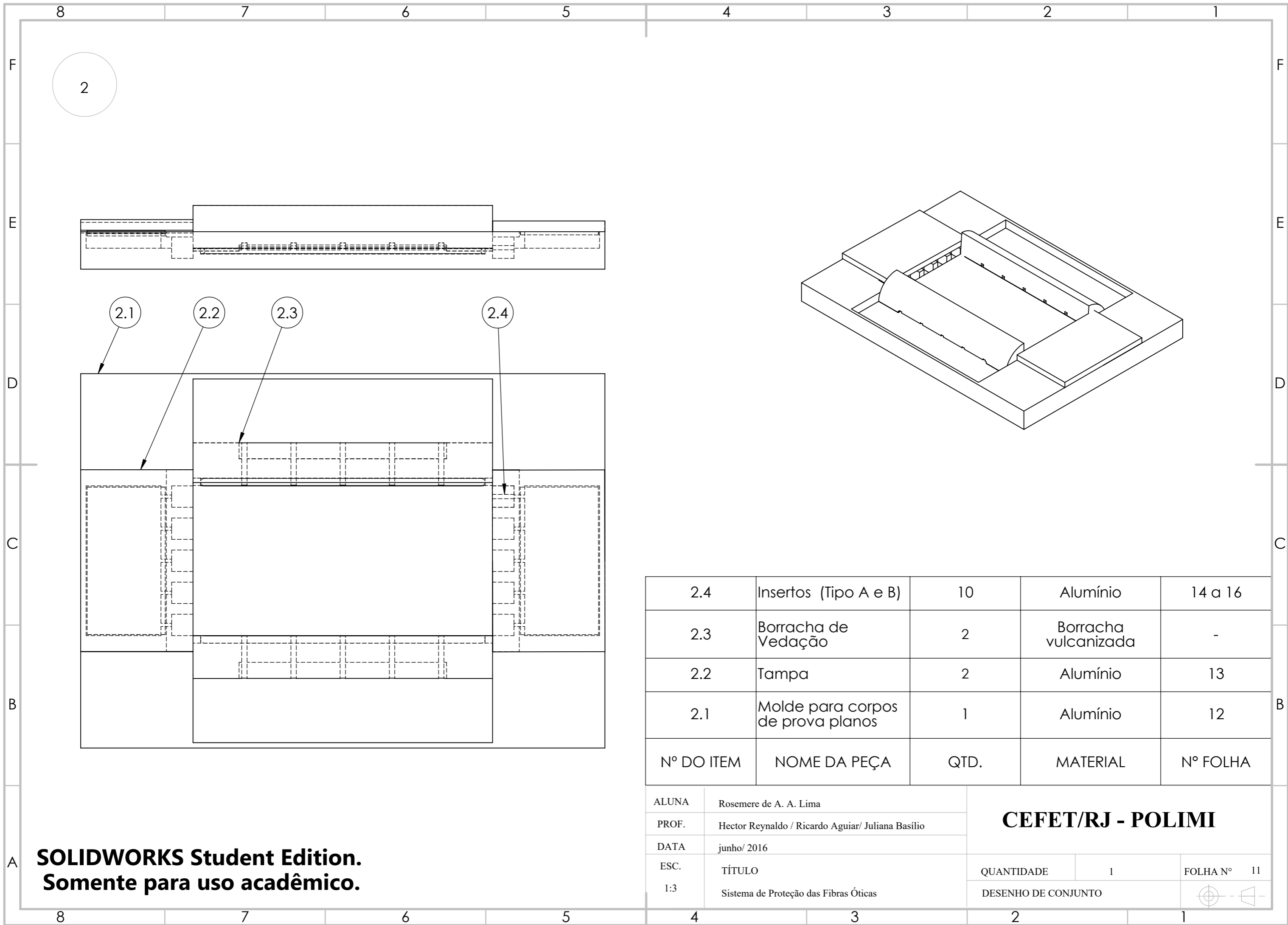
**SOLIDWORKS Student Edition.
Somente para uso acadêmico.**

1.8



1.8	base de alinhamento FBG	1	alumínio
Nº DO ITEM	NOME DA PEÇA	QTD.	MATERIAL / NORMA
ALUNA	Rosemere de A. A. Lima	CEFET/RJ - POLIMI	
PROF.	Hector Reynaldo / Ricardo Aguiar/ Juliana Basilio		
DATA	junho/ 2016		
ESC. 1:1	TÍTULO Molde para corpos de Prova - teste de Pull-out	QUANTIDADE 1	FOLHA Nº 10
		BASE DE ALINHAMENTO FBG	

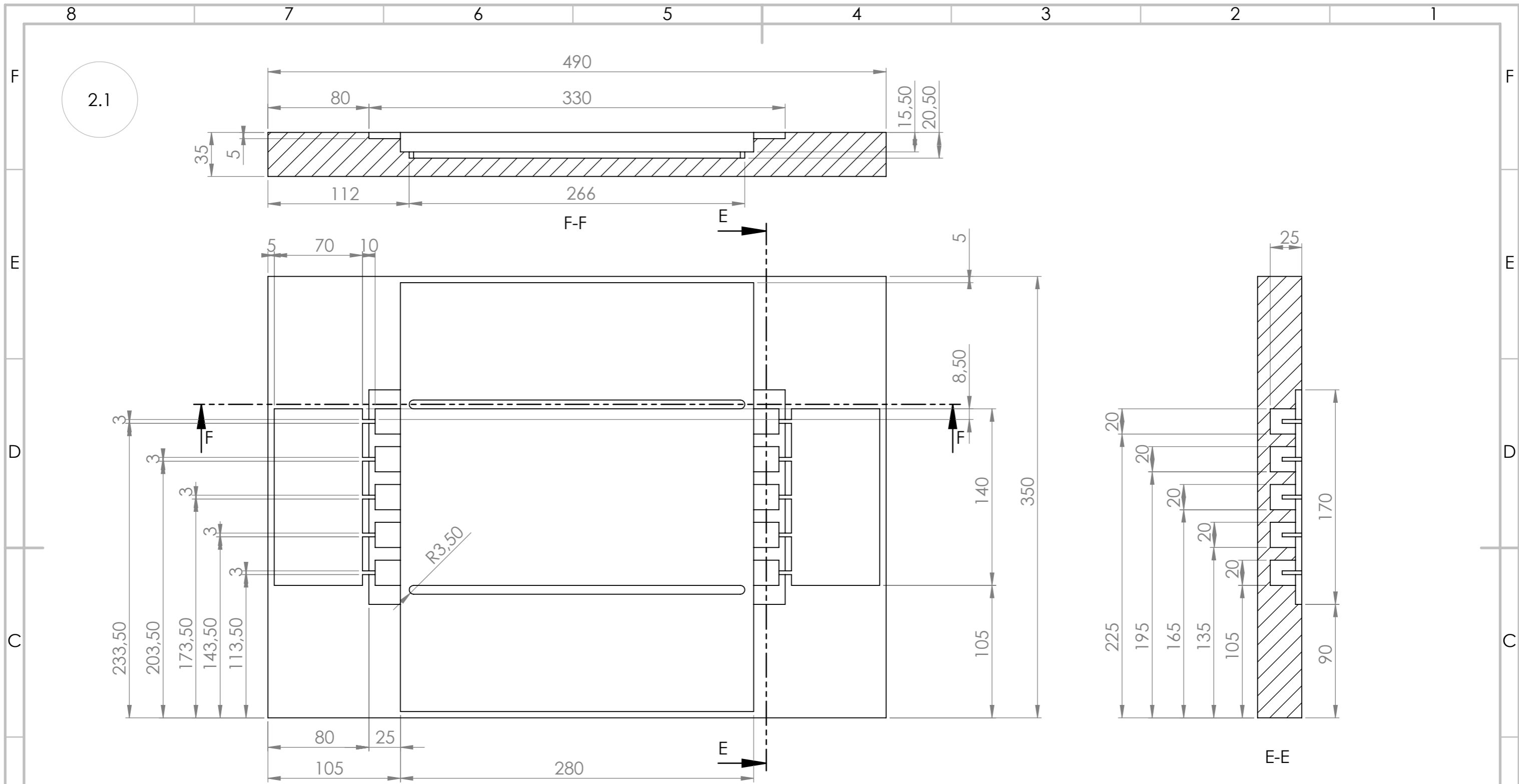
**SOLIDWORKS Student Edition.
Somente para uso acadêmico.**



2.4	Insertos (Tipo A e B)	10	Alumínio	14 a 16
2.3	Borracha de Vedação	2	Borracha vulcanizada	-
2.2	Tampa	2	Alumínio	13
2.1	Molde para corpos de prova planos	1	Alumínio	12
Nº DO ITEM	NOME DA PEÇA	QTD.	MATERIAL	Nº FOLHA

ALUNA	Rosemere de A. A. Lima	CEFET/RJ - POLIMI			
PROF.	Hector Reynaldo / Ricardo Aguiar/ Juliana Basilio				
DATA	junho/ 2016				
ESC.	TÍTULO	QUANTIDADE	1	FOLHA Nº	11
1:3	Sistema de Proteção das Fibras Óticas	DESENHO DE CONJUNTO			

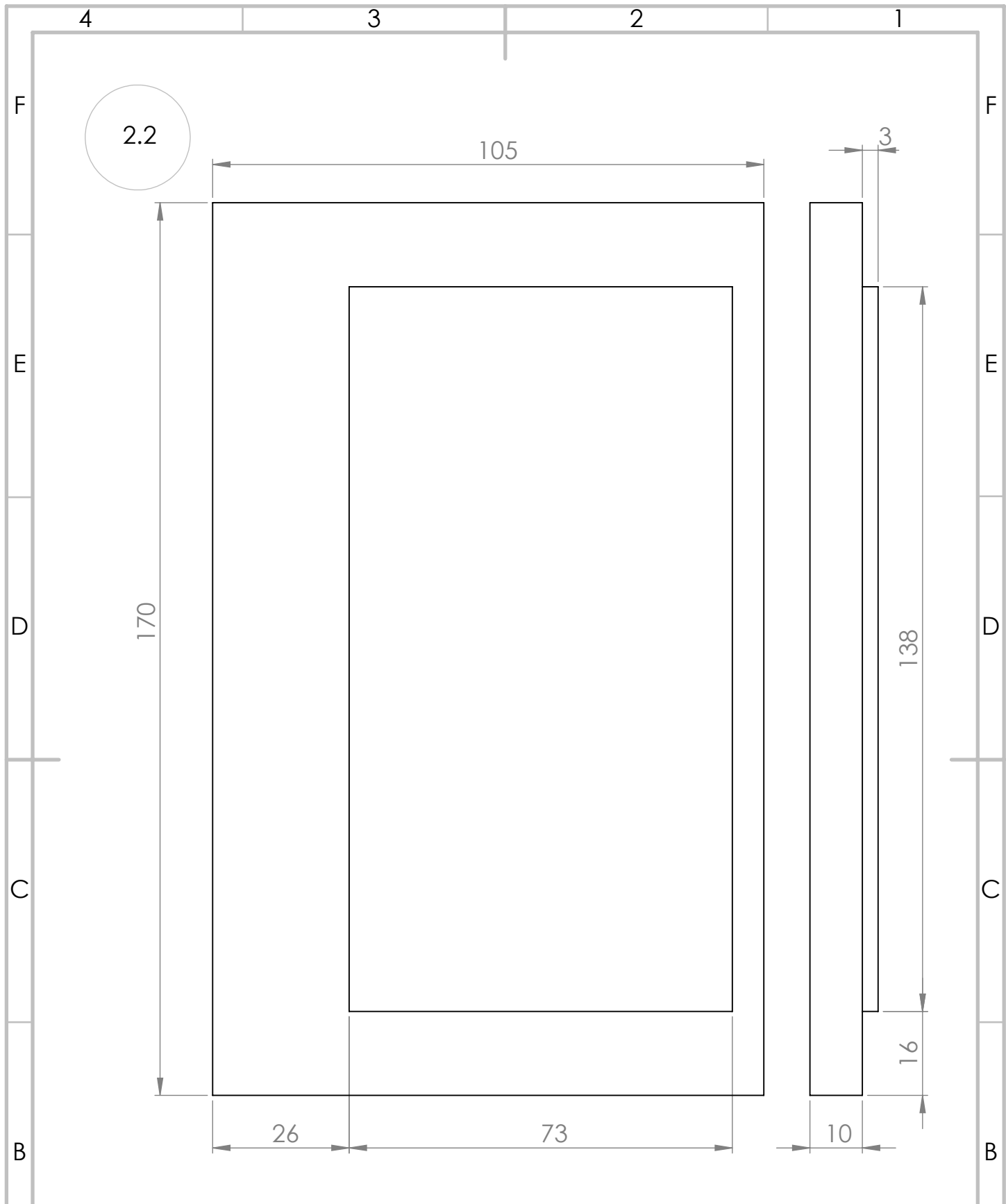
**SOLIDWORKS Student Edition.
Somente para uso acadêmico.**



Observação para fabricação		Todos os cantos da cavidade na qual os insertos serão alojados deverão ter um raio de adoçamento igual a 3mm.	
2.1	Molde para corpos de prova planos	1	Alumínio
Nº DO ITEM	NOME DA PEÇA	QTD.	MATERIAL

ALUNA	Rosemere de A. A. Lima	CEFET/RJ - POLIMI			
PROF.	Hector Reynaldo / Ricardo Aguiar/ Juliana Basilio				
DATA	junho/ 2016				
ESC.	TÍTULO	QUANTIDADE	1	FOLHA Nº	12
1:3	Sistema de Proteção das Fibras Óticas	MOLDE PARA CORPOS DE PROVA PLANOS			

**SOLIDWORKS Student Edition.
Somente para uso acadêmico.**



2.2	tampo	1	aluminio
Nº DO ITEM	NOME DA PEÇA	QTD.	MATERIAL

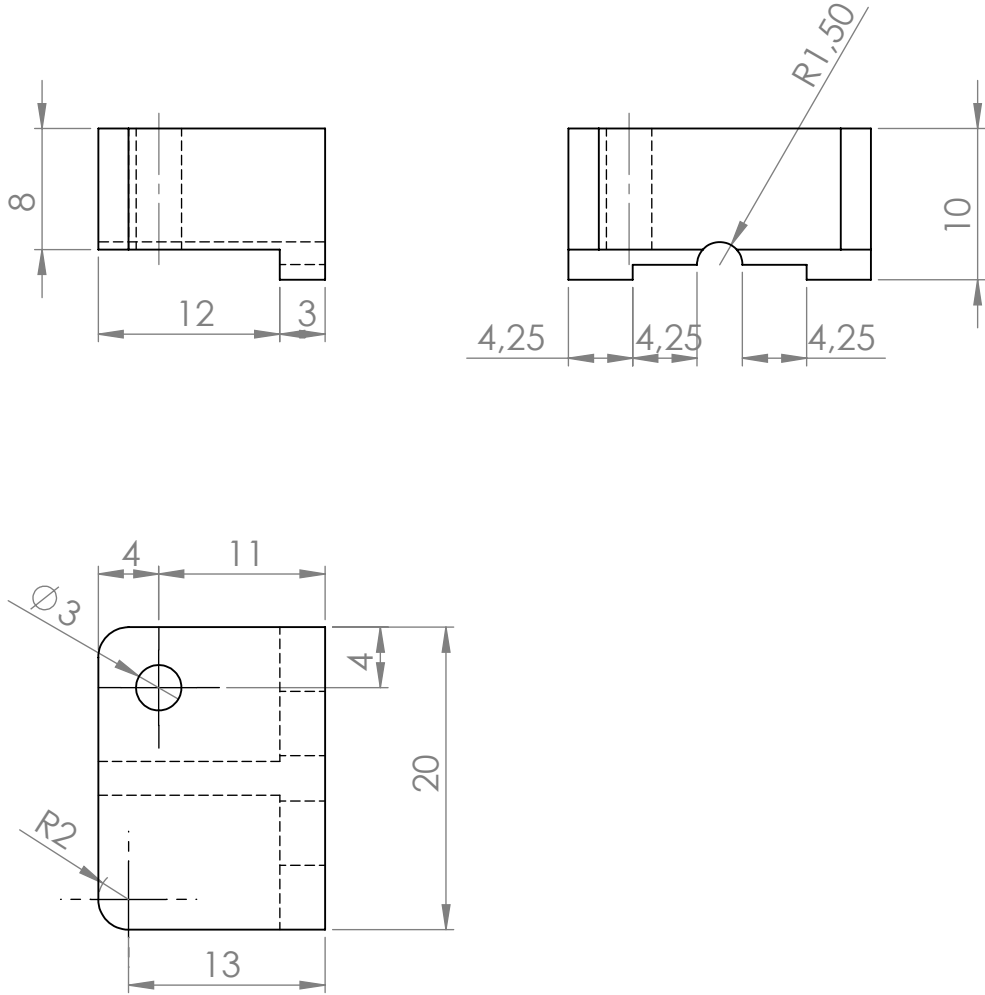
ALUNA	Rosemere de A. A. Lima		
PROF.	Hector Reynaldo / Ricardo Aguiar/ Juliana Basílio		
DATA	junho/ 2016	ESC.	1:1

CEFET/RJ - POLIMI	
TÍTULO	Sistema de Proteção Fibras Óticas
QUANTIDADE	2
FOLHA Nº	13

**SOLIDWORKS Student Edition.
Somente para uso acadêmico.**

TAMPA	
-------	--

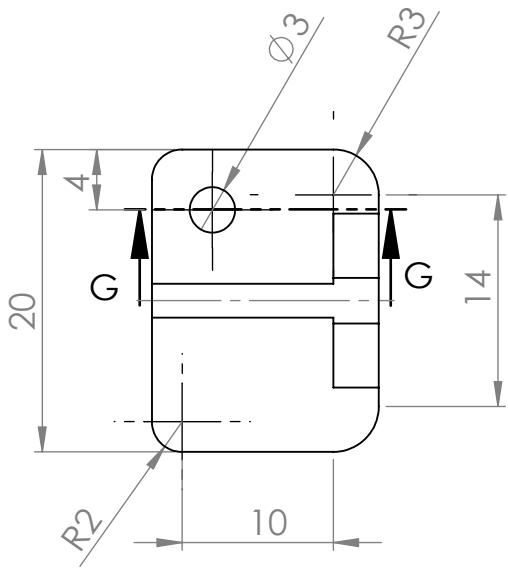
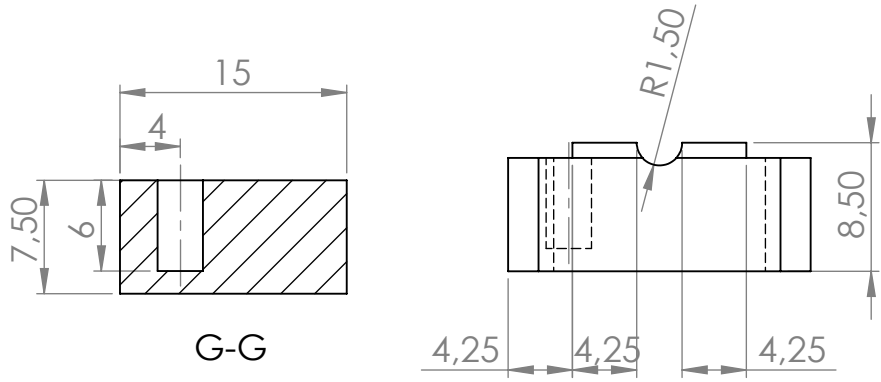
2.4 a



2.4 a	inserto Tipo a	6	aluminio
Nº DO ITEM	NOME DA PEÇA	QTD.	MATERIAL

ALUNA	Rosemere de A. A. Lima			CEFET/RJ - POLIMI		
PROF.	Hector Reynaldo / Ricardo Aguiar/ Juliana Basílio					
DATA	junho/ 2016	ESC.	1:1	TÍTULO	Sistema de Proteção Fibras Óticas	
SOLIDWORKS Student Edition. Somente para uso acadêmico.	QUANTIDADE		6	FOLHA Nº 14		
	INSERTO TIPO A - PARTE SUPERIOR					

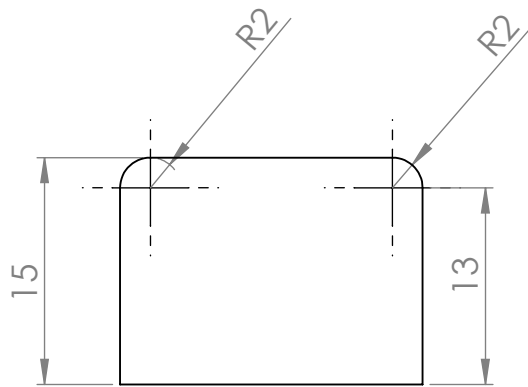
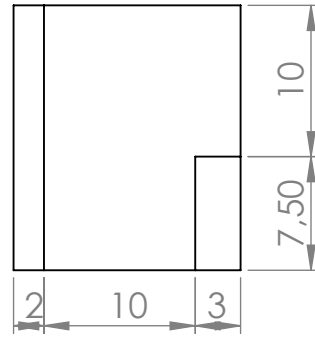
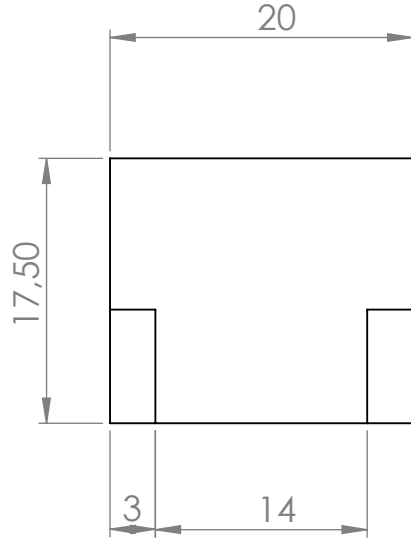
2.4 a



2.4 a	inserto Tipo a	6	aluminio
Nº DO ITEM	Nº DA PEÇA	QTD.	MATERIAL

ALUNA	Rosemere de A. A. Lima		CEFET/RJ - POLIMI		
PROF.	Hector Reynaldo / Ricardo Aguiar/ Juliana Basílio				
DATA	junho/ 2016	ESC.	1:1	TÍTULO	Sistema de Proteção Fibras Óticas
SOLIDWORKS Student Edition. Somente para uso acadêmico.	QUANTIDADE		6	FOLHA Nº 15	
	INSERTO TIPO A- PARTE INFERIOR				

2.4 b



2.4 b	inserto Tipo b	4	aluminio	
Nº DO ITEM	Nº DA PEÇA	QTD.	DESCRIÇÃO	
ALUNA	Rosemere de A. A. Lima	CEFET/RJ - POLIMI		
PROF.	Hector Reynaldo / Ricardo Aguiar/ Juliana Basílio			
DATA	junho/ 2016	ESC.	1:1	
A	SOLIDWORKS Student Edition. Somente para uso acadêmico.		TÍTULO	Sistema de Proteção Fibras Óticas
			QUANTIDADE	4	FOLHA Nº 16
	INSERTO TIPO B			