

MARCELO GRIGOLETTO DE BIASE

**Avaliação da soldabilidade por ultra-som
de Nylon 6[®] e Nylon 6[®] reforçado com fibra
de vidro.**

Trabalho de formatura apresentado à disciplina
PMT – 2598 'Trabalho de formatura para
engenharia de materiais' como requisito para
graduação na Escola Politécnica de São Paulo,
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de
Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Duarte Brandi

Dezembro 2008.

DEDALUS - Acervo - EPMT



31800006705

TF-2008

1737784

B147a

M 2008 AA

MARCELO GRIGOLETTO DE BIASE.

Avaliação da soldabilidade por ultra-som de Nylon 6® e Nylon 6® reforçado com fibra de vidro. São Paulo, 2008.

57 p.

Trabalho de Formatura – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

1. Soldagem. 2. Soldagem por ultra-som. 3. Soldagem de nylon 6. 4. Material compósito. 5. Soldagem de Nylon reforçado com fibra de vidro.

I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais II. TF.

**"Grandes realizações são possíveis quando se dá
importância aos pequenos começos."**

Lao-tsé ("A Arte da Guerra")

Agradecimentos

Primeiramente agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Sérgio Duarte Brandi, que foi fundamental para a concretização deste projeto.

Agradeço ao Sr. Marcos Santana da Radici Plastics de Araçariçuama, por ter gentilmente cedido as amostras para este estudo.

Agradeço aos meus pais, Luis Humberto De Biase e Noemi Grigoletto De Biase e a todos os meus vários irmãos que me apoiaram durante toda a vida até esse momento.

Agradeço aos técnicos Danilo e Vinicius do Departamento de Materiais e Metalurgia pela ajuda na parte experimental realizada.

Este trabalho é a conclusão de anos de intenso aprendizado realizado graças aos excelentes professores que tive na Escola Politécnica da USP.

Resumo

O controle da soldagem de materiais por ultras-som depende de diversos parâmetros como o tempo e a pressão de soldagem. A adição de fibra de reforços no material faz com que estes parâmetros se alterem em relação à do material puro, podendo dificultar a utilização da técnica.

Para a obtenção dos parâmetros de soldagem do nylon 6 e do nylon 6 reforçado por fibra de vidro utilizou-se corpos de prova de injetados com nylon 6 com 0, 15 e 50% em massa de fibra de vidro. As amostras foram soldadas por ultras-som variando-se o tempo de soldagem e a pressão de soldagem. As janelas operacionais de soldagem foram obtidas com base na fração de área unida em relação à área total da junta. Foram realizados ensaios de cisalhamento das juntas e foi analisada a morfologia da fratura da solda.

As junções realizadas nos materiais reforçados exibiram elevada degradação do material ocasionando formação de espuma, causando o enfraquecimento da solda.

Abstract

The processes control for ultrasonic welding depends on several parameters such as welding time and welding pressure. The addition of reinforcement on materials makes those parameters alter, which can difficult the use this welding technique.

In order to obtaining the ultrasonic welding parameters for nylon 6 and glass fiber reinforced nylon 6, samples containing 0, 15, and 50wt% glass fiber were ultrasonically welded. The parameter studied were welding time and pressure. The operating windows were obtained for each material considering the fraction of the bonded area over the total joint area. The maximum shear stress for the weld of each material was obtained and the morphologies of the weld fractures were analyzed.

The welds obtained by this method showed high degradation of the material, causing formation of foam, therefore weaker welds then expected.

Índice de figuras

Figura 1 – Caprolactama	2
Figura 2 – Ácido adípico (acima) e Hexametilenodiamina (abaixo)	3
Figura 3 - Nylon 6 (superior) e Nylon 6,6 (inferior).....	3
Figura 4 - Tanque de ar comprimido para caminhões [6]	7
Figura 5 - Conectores rápidos para altas temperaturas [6].....	8
Figura 6 - Engrenagens em Nylon 6 [7].....	8
Figura 7 - Diversas representações de possíveis reforços	12
Figura 8 - Classificação segundo diversas formas de reforço	13
Figura 9 - MMC com matriz de Ti-6Al-4V com 35% de filamentos de SiC (MEV)	15
Figura 10 - Esquema da montagem para a realização da junção por difusão (extraída do Granta Software).....	22
Figura 11 - Representação esquemática do equipamento de soldagem por ultra- som	26
Figura 12 - Esquema de um diagrama de janelas operacionais	28
Figura 13 - Comportamento térmico do módulo de cisalhamento e do fator de perda mecânica para um polímero amorfo.....	29
Figura 14 - Comportamento térmico do módulo de cisalhamento e do fator de perda mecânica para um polímero semicristalino	30
Figura 15 - Exemplo de resultado de DSC [9]	33
Figura 16 - Equipamento de soldagem utilizado.....	35
Figura 17 - Detalhe das garras de soldagem.....	35
Figura 18 - Detalhe do sonotrodo utilizado	36

Figura 19 - Corpos de prova	37
Figura 21 - Dispositivo para ensaio de cisalhamento.....	39
Figura 22 - DSC de uma amostra do tipo A.....	40
Figura 23 - DSC de uma amostra do tipo B.....	41
Figura 24 - DSC de uma amostra do tipo C.....	41
Figura 25 - Micrografia de uma amostra do tipo A.....	43
Figura 26 - Micrografia de uma amostra do tipo B.....	43
Figura 27 - Micrografia de uma amostra do tipo C.....	44
Figura 29 - Janela operacional – Material tipo B.....	49
Figura 30 - Janela operacional - Material tipo C	49
Figura 31 - Foto da região unida após ensaio de cisalhamento	50
Figura 32 - Fratura da solda de uma amostra A	52
Figura 33 - Fratura da solda de uma amostra B	52
Figura 34 - Fratura da solda de uma amostra C	53
Figura 35 - Detalhe da fratura da solda de uma amostra C	53

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Principais propriedades das poliamidas [4].....	4
Tabela 2 - Propriedades do nylon não reforçado [11].....	6
Tabela 3 - Propriedades das fibras comerciais [4].....	9
Tabela 4 - Tipos de fibras de vidro comerciais [4].....	10
Tabela 5 - Propriedades do nylon reforçado por fibra de vidro a 15% [11].....	19
Tabela 6 - Principais eventos térmicos	33
Tabela 7 - Especificações do equipamento de soldagem [10].....	34
Tabela 8 - Temperaturas de transição vítrea e fusão da matriz para os três tipos de materiais.....	42
Tabela 9 - Caracterização de quantidade de fibra	42
Tabela 10 - Resultados dos ensaios de tração.....	44
Tabela 11 - Áreas soldadas - Amostras A	45
Tabela 12 - Áreas soldadas - Amostras B	46
Tabela 13 - Áreas soldadas - Amostras C	47
Tabela 14 - Parâmetros selecionados para ensaio de cisalhamento.....	50
Tabela 15 - Tensões máximas de cisalhamento das soldas.....	51

Lista de símbolos

J	Joule
K	Kelvin
Pa	Pascal
°C	Graus Celsius
T _g	Temperatura de transição vítrea
T _m	Temperatura de fusão do polímero

Sumário

Agradecimentos	iv
Índice de Tabelas.....	ix
Índice de Tabelas.....	ix
Lista de símbolos	x
Lista de símbolos	x
Sumário	xi
1. OBJETIVOS.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
2.1 Poliamidas - Nylon	2
2.1.1 Características das poliamidas.....	3
2.1.2 Aplicações.....	7
2.2 Fibras de vidro	8
2.3 Materiais compósitos	10
2.3.1 Tipos de Microestrutura de Compósitos.....	11
2.3.2 Aplicações de compósitos.....	13
2.3.3 Classificação de compósitos	14
2.3.3.1 Compósitos de matriz metálica (MMC).....	14
2.3.3.2 Compósitos de matriz cerâmica (CMC)	16
2.3.3.3 Compósitos de matriz polimérica.....	16
2.3.3.3.1 Processamento de PMCs.....	17
2.3.3.3.2 PMCs Comerciais	18
2.4 Nylon reforçado por fibras de vidro	18
2.5 Junção de materiais compósitos.....	19

2.5.1	Adesivos.....	19
2.5.2	Soldagem por atrito.....	21
2.5.3	Soldagem por Microondas.....	21
2.5.4	Junção por difusão.....	22
2.5.5	Soldagem a Laser.....	23
2.5.6	Soldagem por Placa Aquecida.....	24
2.5.7	Soldagem por extrusão.....	25
2.5.8	Soldagem por ultra-som.....	25
2.5.8.1	Parâmetros de soldagem por ultra-som.....	26
2.6	Soldabilidade.....	28
2.6.1	Soldabilidade de polímeros por ultra-som.....	28
2.6.2	Soldabilidade do nylon por ultra-som.....	30
2.6.3	Soldabilidade de nylon reforçado por fibra de vidro.....	31
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	32
3.1	Análise térmica DSC.....	32
3.2	Equipamento de soldagem por ultra-som.....	34
3.3	Sonotrodo utilizado.....	36
3.4	Corpos de prova.....	37
3.5	Caracterização da quantidade de fibras.....	37
3.6	Geometria da junta.....	38
3.7	Caracterização microestrutural.....	38
3.8	Janelas operacionais de soldagem por ultra-som.....	38
3.9	Tensões máximas de cisalhamento das juntas.....	39
3.10	Análise da fratura da solda.....	40
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	40
4.1	Caracterização da Tm e Tg do nylon.....	40

4.2	Caracterização das porcentagens de fibra	42
4.3	Caracterização da microestrutura	42
4.4	Ensaio de tração dos materiais.....	44
4.5	Obtenção das janelas operacionais	45
4.6	Parâmetros para ensaio de cisalhamento.....	50
4.7	Calculo da área soldada	50
4.8	Tensão máxima de cisalhamento das soldas	51
4.9	Fractografia das juntas soldadas	51
5.	CONCLUSÕES.....	54
6.	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	55
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	56

1. OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo identificar os parâmetros de soldagem por ultra-som de chapas de Nylon reforçados com diferentes quantidades de fibra de vidro, bem como verificar os efeitos causados pela presença da fibra na qualidade da junta. Apesar do potencial da aplicação de componentes de Nylon reforçados, ainda são poucos os estudos disponíveis sobre este assunto. Dessa forma este trabalho vem a agregar informações preliminares úteis na utilização de ultra-som na junção desse tipo de compósito.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Poliamidas - Nylon

Poliamidas, popularmente chamadas de nylon (palavra derivada do inglês Nylon), são polímeros termoplásticos semicristalinos que possuem o grupo funcional amida (CONH) polares e regularmente espaçados, por isso cristalizam com alta atração molecular. Também possui uma região alifática, o que confere ao polímero flexibilidade na região amorfa. A combinação de alta coesão na região cristalina e flexibilidade na região amorfa confere ao material uma boa tenacidade em temperaturas acima da Tg.

Existem diversos tipos de poliamidas, que se diferem umas das outras basicamente pelo número de átomos de carbono presentes nos monômeros e pela geometria das cadeias. A denominação da PA é feita com base no número de átomos de carbono presentes nas moléculas-base para sua obtenção. A PA 6, por exemplo é obtida a partir da caprolactama Figura 1 , um composto orgânico que possui 6 átomos de carbono. A PA 6.6 é obtida a partir do ácido adípico e do hexametilenodiamina, Figura 2, ambos possuindo 6 átomos de carbono, assim a PA 6.6 possui 12 átomos de carbono. A figura Figura 3 ilustra as estruturas do nylon 6 e do nylon 6.6.

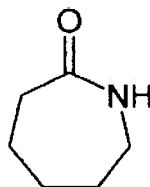


Figura 1 – Caprolactama

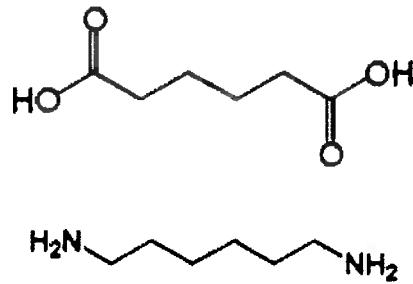


Figura 2 – Ácido adípico (acima) e Hexametilenodiamina (abaixo)

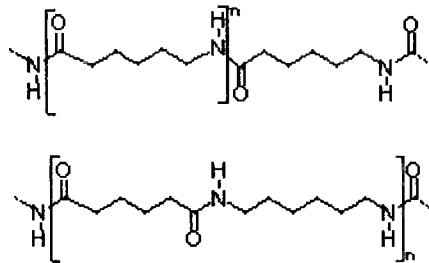


Figura 3 - Nylon 6 (superior) e Nylon 6,6 (inferior)

Existem outros tipos de poliamidas como a PA 12, PA 13, PA 6.10, PA 8, PA 100 entre outras, que são responsáveis por uma boa parte do consumo total de plásticos. Nos Estados Unidos, por exemplo, o consumo destes plásticos representa 30% do consumo total de termoplásticos. Porém, as mais comumente empregadas são as PA 6 e PA 6.6, que possuem melhores propriedades de interesse comercial, sendo o consumo destas no Brasil da ordem de 25.000 t/ano, sem considerar a produção de fibras têxteis.

2.1.1 Características das poliamidas

Todas as poliamidas são higroscópicas, isto é, absorvem água do ambiente. Conforme visto na Tabela 1, as PA 6 e 6.6 possuem as maiores taxas de absorção de água dentre as poliamidas. Isto ocorre porque a unidade repetitiva é mais curta o que eleva a densidade de grupos amida, onde as moléculas de água irão se ligar.

A Tabela 1 apresenta a comparação entre as principais propriedades de diferentes poliamidas comerciais.

Tabela 1 - Principais propriedades das poliamidas [4]

Propriedades	Unidade	PA 6	PA 11	PA 12	PA 6.6	PA 6.10	PA 6.12
Temperatura de fusão	°C	215	185	177	252	215	210
Densidade	(g/cm ³)	1,14	1,04	1,02	1,15	1,08	1,07
Resistência a tração	(Mpa)	83	55	52	83	62	59
Módulo de flexão	(Mpa)	2.758	1.241	1.172	2.826	2.413	1.999
Absorção de água	% em 24h de imersão	1,7	0,3	0,25	1,5	0,5	0,4

A cristalinidade depende do arranjo das cadeias moleculares. Se o arranjo for altamente ordenado o polímero possui alta cristalinidade. Como consequência da absorção de água, as cadeias poliméricas tornam-se mais afastadas, diminuindo a coesão entre as moléculas do polímero. Dessa forma, a absorção de água diminui a cristalinidade e a temperatura de transição vítrea da poliamida. Tipicamente a Tg de um PA 6 ou 6.6 é de 50°C. Esse valor pode ser reduzido para 0°C devido à absorção de água, tornando o material mais tenaz e, por outro lado, menos resistente a fluência e com menor rigidez. A cinética de cristalização também é alterada devido à umidade, a cristalização do polímero ocorre mais lentamente com a absorção de água ocasionando efeitos de encolhimento pós-moldagem que podem se estender por mais de 2 anos. Este efeito é negativo é menos intenso no nylon 6.

Como as PA 6 e 6.6 somente atingem tenacidade ótima após o período de absorção de umidade, por volta de 1 a 2%, os produtos devem ser solicitados apenas após esse período.

As poliamidas de cadeias mais longas apresentam valores significativamente inferiores de absorção de água, portanto apresentam menores variações de propriedades pós-moldagem, mas possuem menores resistências à tração, abrasão e tenacidade.

As principais vantagens do nylon são:

- Alta resistência mecânica;
- Baixo peso específico;
- Baixo custo;
- Ponto de fusão elevado;
- Boa resistência à fadiga;
- Resistência ao impacto;
- Resistência ao desgaste e à abrasão;
- Auto lubrificante;
- Isolamento termoelétrico;
- Baixo coeficiente de atrito;
- Grande absorção de vibrações.
- Altamente impermeáveis a gases
- São recicláveis
- Resistentes a intempéries

A Tabela 2 apresenta as principais propriedades do nylon não reforçado.

Tabela 2 - Propriedades do nylon não reforçado [11]

Permanência	Sistema inglês	SI métrico	ASTM
Densidade	1.13 g/cm ³	1.13 g/cm ³	D 792
Encolhimento no molde			
Secção 1/8 in (3.2 mm)	0.0130 - 0.0170 in/in	1.30 - 1.70 %	D 955
Absorção de água, 24 hrs a 23°C	1.900 %	1.900 %	D 570
Mecânicas			
Resistência ao impacto, Izod			
Com entalhe secção 1/8 in (3.2 mm)	0.8 ft-lbs/in	43 J/m	D 256
Sem entalhe secção 1/8 in (3.2 mm)	No Break	No Break	D 4812
Resistência à tração	11000 psi	76 MPa	D 638
Elongação na tração	> 10.0 %	> 10.0 %	D 638
Módulo de rigidez na tração	0.40 x 10 ⁶ psi	2758 MPa	D 638
Resistência à flexão	16000 psi	110 MPa	D 790
Módulo de rigidez na flexão	0.43 x 10 ⁶ psi	2965 MPa	D 790
Dureza			
Rockwell, R	116	116	D 785
Elétricas			
Rigidez dielétrica, S/T, em óleo	400 VPM	15.7 kV/mm	D 149
Constante dielétrica, 1 MHz, seco	3.4	3.4	D 150
Fator de dissipação, 1 MHz, seco	0.03	0.03	D 150
Resistividade volumétrica	> 1E11 ohm.cm	> 1E11 ohm.cm	D 257
Térmicas			
Temperatura de deflexão			
A 264 psi (1820 kPa)	160 °F	71 °C	D 648
A 66 psi (455 kPa)	340 °F	171 °C	D 648
Resistência a chama			
Flamabilidade	V-2 em 1/32 in	V-2 em 0.8 mm	UL94
Processamento por injeção			
Pressão de injeção	10000 - 15000 psi	69 - 103 MPa	
Temperatura de fusão	470 - 535 °F	243 - 279 °C	
Temperatura de moldagem	130 - 200 °F	54 - 93 °C	
Secagem	2 hrs em 180 °F	2 hrs em 82 °C	
Umidade	0.20 %	0.20 %	
Temperatura de orvalho	0 °F	-18 °C	

2.1.2 Aplicações

As poliamidas em geral são utilizadas na fabricação de diversos produtos, dentre os quais se destacam:

- Engrenagens
- Estrelas de alimentação
- Mancais
- Buchas
- Rosca-sem-fim
- Sapatas e chavetas de laminação de aço
- Perfis e guias
- Porcas e parafusos
- Roldanas de impacto
- Calotas para rodas de carros
- Lâminas raspadoras
- Cepos e batentes

As figuras Figura 4, Figura 5 e Figura 6 ilustram produtos de poliamidas presentes no mercado.



Figura 4 - Tanque de ar comprimido para caminhões [6]



Figura 5 - Conectores rápidos para altas temperaturas [6]



Figura 6 - Engrenagens em Nylon 6 [7]

2.2 Fibras de vidro

Existem diversos tipos de fibras para reforços, entre elas as fibras de carbono, de aramidas e de vidro são as mais utilizadas. As fibras de carbono são as que reúnem melhores propriedades mecânicas como: baixa densidade, alta resistência à tração e alto módulo de elasticidade. Porém, seu uso é muito limitado devido ao seu elevado custo. As fibras de vidro são as mais utilizadas por reunirem boas propriedades mecânicas e baixo custo. A Tabela 3 apresenta o comparativo de propriedades entre as fibras mais comuns no mercado.

Tabela 3 - Propriedades das fibras comerciais [4]

Mateial	Módulo de elasticidade GPa	Resistência a tração GPa	Resistência a compressão GPa	Densdade g/cm ³
Aço	200	2.8		7.8
Liga de Al	71	0.6		2.7
Liga de Ti	106	1.2		4.5
Alumina	350-380	1.7	6.9	3.7
Boro	415	3.5	5.9	2.5
SiC	200	2.8	3.1	2.8
Vidro E	70	2,4	-	2,55
Vidro S	90	4.5	>1,1	2.46
Carbono (piche)	725	2.2	0.48	2.15
Carbono (PAN)	585	3.8	1.67	1.94
Kevlar 49	125	3.5	0,39-0,48	1.45
Kevlar 149	185	3.4	0,32-0,46	1.47
PBZT	325	4.1	0,26-0,41	1.58
PBZO	360	5.7	0,2-0,4	1.58
Spectra 10000	172	3	0.17	1
Vectran	65	2.9		1.4
Technora	70	3		1.39
Náilon	6	1	0.1	1.14
PET Textil	12	1.2	0.09	1.39

Embora a resistência mecânica e a densidade sejam, normalmente, os parâmetros mais importantes na escolha da fibra a ser utilizada, outros parâmetros devem ser considerados no projeto como a resistência química e a compatibilidade da fibra com a matriz. A Tabela 4 apresenta os diferentes tipos de fibras de vidro e suas características.

As fibras do tipo "A" apresentam perda de massa de 11% após 1h de imersão em água em temperatura de ebulição. As fibras do tipo "E" e "C" perdem 1,5% e 0,15% respectivamente. Embora sejam menos resistentes ao ataque por água, as fibras do tipo "E" conservam melhor as propriedades de resistência mecânica nestas condições. Fibras do tipo "C" apresentam melhor resistência ao ataque de ácidos e álcalis em relação às fibras dos tipos "A" e "E". Devido à maior retenção das propriedades mecânicas, as fibras do tipo "E" são mais utilizadas como reforços em compósitos de matriz poliméricas. Algumas modificações foram realizadas ao longo do tempo em fibras "E" para ampliar sua aplicabilidade. Para melhorar a resistência ao ataque de álcalis e ácidos desenvolveu-se as fibras do tipo "E-CR. Para melhorar

o módulo de Young, utilizou-se adições de berílio às fibras, criando-se o tipo “M”. Entretanto, o uso do berílio inviabiliza sua aplicação comercial. Para contornar esse problemas as fibras do tipo “S” foram desenvolvidas. Disponíveis em graus de alta e média performance, essas fibras podem ter resistência até 40% maior do que o tipo “E” e são empregadas na indústria aeronáutica e aeroespacial.

Tabela 4 - Tipos de fibras de vidro comerciais [4]

Tipo	Designacao	Indicações	Precauções
A	vidro de sódio (vidro de garrafa)	boa resistência química	baixa resistência ao ataque por água e baixa resistividade elétrica
C	vidro de sódio-borossilicato	excelente resistência aos ácidos	baixa resistividade elétrica
D	vidros de baixa densidade	boa resistividade elétrica	baixa resistencia ao ataque por água
E	vidro de cálcio-alumínio-borossilicato	alta resistividade elétrica	suscetível ao ataque por ácidos ou álcalis
E-CR	vidro E modificado	melhores reistência aos ácidos e álcalis do que o vidro E	
M	vidro de alto módulo	maior módulo de Young e mesma resistência à tração do que o vidro E	
S	vidro de magnésio-alumínio-borossilicato	módulo de Young e resistência à tração maior do que o vidro E	menor módulo de Young do que o vidro S
Z ou AR	vidro resistente a álcalis	desenvolvido especialmente para uso em cimento Portland	

2.3 Materiais compósitos

Uma das possíveis classificações dos materiais, sendo bastante básica, é dividi-los em três grandes grupos: metais, polímeros e cerâmicas. No entanto, quando se realiza uma combinação de mais de um tipo de material, chamamos essa combinação de compósito. Se usarmos esse conceito básico de compósitos como materiais contendo mais de uma fase, veremos que eles já existem há bastante tempo na história. Para construções altas, alguns povos antigos usavam uma técnica que consistia em plantar plantas rasteiras em uma camada de terra. Quando as raízes já estavam fixadas, uma nova camada de terra era colocada e novas plantas eram plantadas. Fazia-se isso sucessivamente, até conseguir altos montes

de terra, reforçado pelas raízes das plantas. Outro material de construção extremamente antigo que pode ser considerado um compósito é o concreto, constituído de pedras e areia (conhecidos por agregado e agregado fino, respectivamente), mantidos unidos por cimento. Mais próximo da noção de compósito na engenharia está o concreto pró-tendido, um macro compósito constituído de cerâmica (cimento) reforçada por material metálico (aço). Assim, combina-se a enorme resistência à compressão do concreto com a resistência a tração do aço. Esse avanço possibilitou, por exemplo, a construção de prédios muito mais altos e pontes com vãos maiores, além de arquiteturas impossíveis de se construir com concreto convencional.

Porém, definindo melhor compósitos onde é evidente a ação da engenharia de materiais, mais três parâmetros podem ser adicionados à definição: os constituintes devem estar presentes a uma quantidade razoável ($> 5\%$). Cada fase deve ter propriedades diferentes, para haver uma interação entre eles, fazendo com que as propriedades finais dos materiais sejam notadamente diferentes das propriedades de cada um dos constituintes isolados. E os constituintes devem ser intimamente misturados e combinados por várias rotas que visem o compósito. Assim, uma liga metálica constituída por duas fases provenientes da solidificação não é em geral classificada como compósito, enquanto um plástico reforçado por fibras sim, mesmo as duas fases sendo poliméricas.

2.3.1 Tipos de Microestrutura de Compósitos

Como definido anteriormente, compósitos são constituídos de mais de uma fase, a matriz e o reforço. Em geral a matriz é a fase contínua, presente em maior quantidade e a fase da qual se deseja modificar as propriedades, podendo ser metálica, cerâmica ou polimérica. A segunda fase é chamada reforço, e a ela são atribuídas as mudanças de característica do compósito. Por exemplo, um reforço cerâmico em uma matriz metálica, significa que uma fase cerâmica dura e rígida reforça uma matriz metálica dúctil.

As propriedades finais do material vão depender fortemente da geometria do reforço e como este é colocado na matriz. Em geral uma das dimensões é pequena,

menor que $500\mu\text{m}$ e até mesmo da ordem de nanômetros. Vários tipos de reforço particulado podem ser feitos, e são usualmente divididos em tipos:

Fibras: fibras são reforços na qual uma direção é muito maior que a dimensão de um corte transversal, sendo que essa razão pode variar enormemente, dividindo essa classe em outras duas, as fibras de reforço contínuo, constituído de fibras longas e reforço descontínuo, onde fibras mais curtas são utilizadas. Novamente, essas fibras podem ser orientadas preferencialmente ou aleatoriamente.

Particulado: são partículas que tem aproximadamente o mesmo tamanho em todas as dimensões, com seu formato podendo ser esférico, cúbico, achatado ou irregular. A distribuição pode ser orientada ou aleatória, sendo esta última a mais comum.

Multicamadas: são um caso especial das fibras, pois também têm sua seção transversal menor que uma dada direção, e constituídos de placas que podem ser organizadas umas em cima das outras todas na mesma direção ou então em direções cruzadas. Essas placas são organizadas em uma seqüência específica e também são conhecidas por laminados.

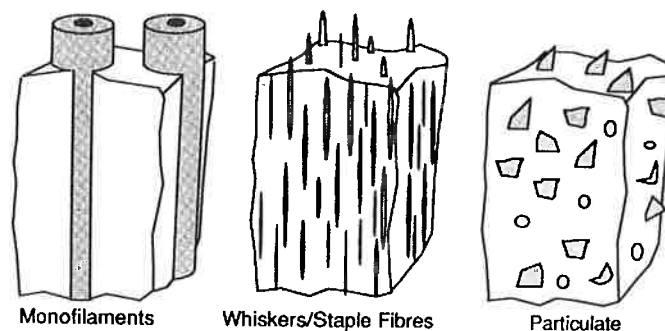


Figura 7 - Diversas representações de possíveis reforços

O esquema a seguir mostra uma forma de classificação dos compósitos segundo a disposição do reforço.

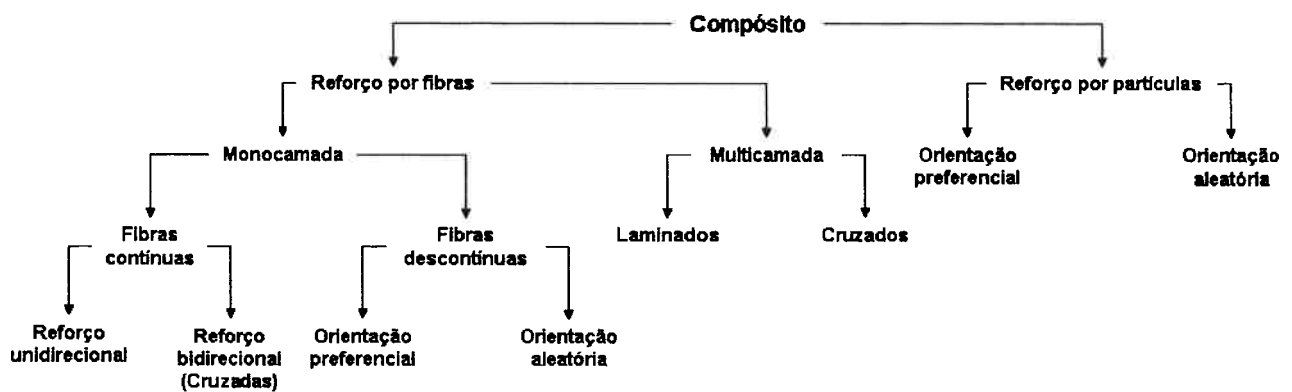


Figura 8 - Classificação segundo diversas formas de reforço

Dentro dos compósitos, podemos subdividi-los conforme o tipo de matriz, o que leva a três subdivisões: compósitos de matriz metálica, de matriz polimérica e de matriz cerâmica. Cada uma delas será detalhada a seguir.

2.3.2 Aplicações de compósitos

Na contínua busca por melhores propriedades e características, que podem incluir um menor peso, maior resistência mecânica ou redução de custo, os cientistas e engenheiros estão sempre buscando melhorar os materiais tradicionais ou então criar materiais completamente novos, para extrair suas melhores características. Os compósitos são materiais compostos de mais de uma fase, que buscam conciliar as características de cada uma delas, combinando suas melhores contribuições.

Com o conceito de que têm melhores propriedades que as fases isoladas, os compósitos vem ganhando notoriedade ao longo das décadas e suas aplicações são cada vez mais freqüentes. De uma forma geral, cada material tem uma desvantagem, que se busca contornar através do reforço. Na busca por materiais de menor densidade para a indústria automobilística, as ligas de alumínio se tornaram bastante atraentes. O alumínio, no entanto, tem baixo ponto de fusão, e conseqüentemente suas propriedades são deterioradas com o aumento da temperatura. Uma maneira de se contornar esse problema é a adição de particulado de alumina, que por ter um ponto de fusão mais elevado, faz com que o compósito responda melhor em altas temperaturas. Um dos mais bem sucedidos exemplos de

aplicação de um compósito foi a substituição de uma liga de ferro fundido com Ni (Ni-resist[®]) por um compósito de alumínio com 5% de alumina em uma enxerto de pistão de motor a diesel da Toyota, com a função de evitar o emperramento da peça. A liga de ferro fundido tinha problemas com a condução de calor e resistência ao desgaste. Já o compósito apresentou melhores características em relação a resistência a fadiga, a resistência ao emperramento e resistência ao desgaste.

Os exemplos acima ilustram como se podem contornar eventuais problemas pela aplicação de um material compósito, sendo essa a grande motivação para seu uso, buscando melhores características como menor peso, maior resistência mecânica e térmica, além de menor custo. Outro aspecto é a possibilidade de substituir um material por outro, como metais por plástico reforçado.

2.3.3 Classificação de compósitos

2.3.3.1 Compósitos de matriz metálica (MMC)

Os compósitos de matriz metálica (também conhecidos pela sigla MMC, do inglês *metal matrix composites*) são conhecidos do homem desde a antiguidade. Ferramentas de perfurar feitas de cobre encontradas na Turquia, datadas de 7000a.C., continham inclusões não metálicas, provenientes do processo de produção, que envolvia sucessivas laminações e martelamento.

A fase de reforço é em geral cerâmica, podendo ainda ser de alguns metais refratários. A importância dos MMCs para a indústria vem crescendo, devido ao progresso nas técnicas de processamento e do melhor entendimento das relações entre microestrutura e propriedade. A microestrutura de um MMC pode seguir qualquer uma das já listadas, com alguma exceção para os laminados. Sua versatilidade é reflexo da facilidade de conformação da matriz, o que faz com que se possa fabricar um MMC e estocá-lo em algumas formas padrões, para depois ser transformado em outras peças. Isso é uma grande vantagem, por exemplo, em relação aos compósitos de matriz polimérica. Porém, antes de se pensar em como obter a forma final de uma determinada peça, é preciso antes fazer com que o reforço esteja na configuração desejada.

Os compósitos endurecidos por dispersões foram os primeiros a serem estudados, como o sistema alumínio com alumina, nos anos 1920. Idêntico às ligas metálicas endurecidas por precipitação, desenvolvidas na década de 1930, o mecanismo responsável pelo endurecimento é o impedimento da movimentação das discordâncias por pequenas partículas incorporadas à matriz, como óxidos. A vantagem que um MMC tem em relação a uma liga endurecida por precipitação é que ao adicionar uma fase cerâmica, esta é estável a temperaturas muito elevadas, fazendo com que o reforço funcione em uma ampla faixa de temperatura. Outros reforços cerâmicos foram sendo testados ao longo do tempo, como partículas de SiC e de Al_2O_3 , desenvolvidas durante os anos 1980.

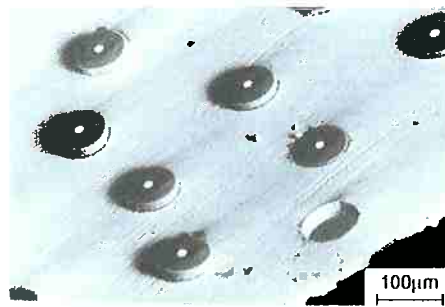


Figura 9 - MMC com matriz de Ti-6Al-4V com 35% de filamentos de SiC (MEV)

A modificação das propriedades dos MMCs em relação aos metais são várias. O coeficiente de expansão térmica, que é alto em metais, pode ser diminuído com o reforço de uma cerâmica, que tem baixo coeficiente, ocorrendo o mesmo quando se trata de condutividade. Já a deformação em altas temperaturas é também melhorada, podendo em algumas ligas de magnésio, chegar a uma melhora de 6000% com adição de fibra de carbono. É importante notar que as diferenças de expansão térmica podem se tornar problemáticas se forem muito diferentes entre as fases, podendo criar tensões e destacamento. Porém, o reforço cerâmico melhora o desempenho do compósito de matriz metálica a altas temperaturas, fazendo com que suas propriedades se conservem por uma faixa mais ampla. Um efeito prejudicial é a diminuição da tenacidade e ductilidade, devido ao reforço cerâmico.

2.3.3.2 Compósitos de matriz cerâmica (CMC)

Há um pequeno atraso de desenvolvimento dos compósitos de matriz cerâmica (CMC) em relação aos outros tipos de compósitos. Isto decorre do fato que o processamento de CMCs envolvem altas temperaturas, como também parte de suas aplicações finais, e logo necessitam de reforços que suportem estas temperaturas. Esta restrição somente foi devidamente ultrapassada após o advento da fabricação de fibras e whiskers de cerâmicas de altas temperaturas como o carboneto de silício (SiC).

Outro problema grave associado aos CMCs é a diferença de expansão térmica entre as fases, que enquanto nos MMCs é possível atenuar com a deformação plástica da matriz, na matriz cerâmica dura deve ser mais limitada para não fraturar a peça.

2.3.3.3 Compósitos de matriz polimérica

Os compósitos de matriz polimérica (PMC) são em sua variedade os materiais compósitos mais utilizados. Isso se deve ao fato de que os polímeros geralmente apresentam baixo custo, baixo módulo de elasticidade e baixa resistência quando isolados, tendo considerável aumento de suas propriedades mecânicas com o reforço. Este fato também é devido ao processamento destes materiais, que não exige altas temperaturas e altas pressões comparadas aos outros tipos de matrizes, e também à sua baixa reatividade com a fase de reforço (quando não exposto a solventes), o que diminui a degradação do material.

Inicialmente, os PMCs surgiram na indústria espacial para substituir o alumínio em alguns componentes, por ter também baixa densidade e apresentar maiores limites de fadiga e resistência à corrosão, logo conquistando outras aplicações estruturais pelo seu baixo custo relativo e baixo peso específico. Desta espécie, o plástico reforçado com fibra de vidro é o mais amplamente utilizado por seu baixo custo relativo, apenas perdendo para o concreto, que é um compósito de matriz cerâmica.

Para as matrizes de PMC, todas as classes de polímeros (termoplásticos, termofixos, e elastômeros) são consideravelmente utilizadas, porém os termofixos ocupam quase 75% de toda a produção de matrizes para compósitos. As principais desvantagens de um PMC estão no limite baixo de temperatura de trabalho (podendo haver fluência em temperatura ambiente), alto coeficiente de expansão térmica, e degradação quando exposto à radiação, sendo necessária a adição de aditivos para conservá-los.

Para a junção de PMCs, com a exceção da junta mecânica e a colagem, as técnicas consistem em quebrar ligações nas superfícies das peças, para que estas se formem através da junta. Para isso, é preciso garantir uma fonte de calor externa ou “interna”. Do primeiro tipo, são utilizadas as técnicas de soldagem por “hot plate”, aquecimento a gás, resistência, indução, ou a laser com o uso problemático em fases amorfas. Para o segundo tipo, são freqüentemente utilizadas soldagem por atrito, microondas, e ultra-som, nos quais o calor é gerado por fricção entre as partes. Para os PMCs termoplásticos semi-cristalinos, a temperatura crítica de soldagem é a temperatura de fusão (melting temperature), enquanto para PMCs termoplásticos amorfos, a temperatura crítica deve ser a temperatura de amolecimento (glassy temperature). Estas técnicas competem com as técnicas de junta mecânica pela ausência de entalhes como o furo indesejáveis em altas solicitações mecânicas, e substituem a colagem em baixas tensões em casos de incompatibilidade da matriz ou da fase de reforço com o adesivo.

2.3.3.3.1 Processamento de PMCs

Para o processamento de PMCs, é possível “curar” a resina com a fase de reforço já misturada na pré-forma para simples geometrias ou em superfícies, ou utilizar a injeção em moldes, mas somente para casos de fibras curtas e particulados finos, por haver considerável restrição reológica destas misturas. De forma semelhante ao processamento de CMCs, para o uso de fibra contínua, esta é imersa em resina ou no termoplástico fundido antes de ser traçada ou cortadas, e a polimerização ocorre entre as fibras trançadas.

2.3.3.3.2 PMCs Comerciais

Dentre os PMCs industriais mais utilizados estão os já citados anteriormente plásticos reforçados com fibras de vidro. Há também um grande uso de fibras de carbono ou de aramida (Kevlar) freqüentemente em matriz de epóxi, que é um termofixo que mantém suas propriedades em temperaturas mais altas das que os outros polímeros suportam.

Outro PMC conhecido é o de matriz de Polyetheretherketone (PEEK) que é um termoplástico com boas propriedades mecânicas em função do grau de cristalização, auto-extinção de combustão, e diferentemente dos termofixos, absorve pouca água. Como o PEEK tem boa resistência química, ele é ideal para aplicações em componentes com freqüente contato com combustíveis e líquidos em uma aeronave. Como o PEEK tende a se cristalizar facilmente, ao manter o seu estado amorfo, a fase de reforço deve ter pouco ajuste do reticulado sólido com o PEEK para evitar nucleação heterogênea, sendo freqüentemente utilizado fibra contínua de carbono (alta resistência mecânica).

No caso de elastômeros, como é raro a utilização destes isoladamente em engenharia, normalmente tratam-se de compostos elastoméricos. Como exemplo de fase de reforço, o uso do negro-de-fumo para aumentar o módulo de elasticidade e evitar degradação por exposição a ultravioleta, já é bem difundido e comum.

2.4 Nylon reforçado por fibras de vidro

A utilização de compósitos de matriz de nylon e reforço de fibra de vidro pode ser vantajosa, uma vez que combina propriedades do nylon, como alta tenacidade e facilidade de processamento, com as características das fibras de vidro, como resistência ao calor alta resistência a tração. A Tabela 5 contém algumas propriedades típicas para nylon com 15% de fibra de vidro.

Tabela 5 - Propriedades do nylon reforçado por fibra de vidro a 15% [11]

Permanência	Sistema inglês	SI métrico	ASTM
Densidade	15 %	15 %	
Encolhimento no molde	1.23	1.23	D 792
Secção 1/8 in (3.2 mm)			
Absorção de água, 24 hrs a 23°C	0.0030 - 0.0060 in/in	0.30 - 0.60 %	D 955
Mecânicas			
Resistência ao impacto, Izod			
Com entalhe secção 1/8 in (3.2 mm)	0.9 ft-lbs/in	48 J/m	D 256
Sem entalhe secção 1/8 in (3.2 mm)	10.0 ft-lbs/in	534 J/m	D 4812
Resistência à Tração	15000 psi	103 MPa	D 638
Elongação na tração	3.0 - 4.0 %	3.0 - 4.0 %	D 638
Módulo de rigidez na tração	0.80 x 10 ⁶ psi	5516 MPa	D 638
Resistência à flexão	23000 psi	159 MPa	D 790
Módulo de rigidez na flexão	0.70 x 10 ⁶ psi	4826 MPa	D 790
Térmicas			
Resistência a chama			
Flamabilidade	HB @ 1/16 in	HB @ 1.5 mm	D 635

2.5 Junção de materiais compósitos

Existem diversos métodos de junção de polímeros que podem, e são aplicados aos materiais compósitos de matriz polimérica. Cada método possui características específicas que o torna mais ou menos eficiente para um determinado projeto. A seguir serão discutidos alguns dos principais métodos de junção de materiais poliméricos.

2.5.1 Adesivos

Devido a sua alta versatilidade, os adesivos vêm sendo cada vez mais utilizados e estudados para a junção de materiais.

Uniões com adesivos possuem grande resistência ao cisalhamento, mas baixa resistência ao descascamento. Portanto, o objetivo de um bom projeto de junção por adesivos é direcionar a carga aplicada para cisalhamento e minimizar a tensão na direção do descascamento.

Praticamente todos os materiais podem ser unidos por adesivos, já que a sua aplicação não exige a fusão do material. Isto é particularmente interessante para a junção de cerâmicos e polímeros termofixos, ou compósitos de matrizes formadas por esses materiais. O adesivo deve ser selecionado de forma que este seja compatível com as superfícies a serem unidas. Os parâmetros que medem a compatibilidade de um adesivo com um material são principalmente: molhabilidade e adesão.

Os adesivos possuem grande aplicação na junção de compósitos reforçados com fibras, pois, permitem a continuidade das fibras mesmo que sejam relativamente longas. Chapas laminadas de matriz epóxi ou poliéster reforçadas com fibras de vidro, carbono ou aramida, bastante utilizadas, não podem ser unidas por soldagem convencional, pois tanto o poliéster quanto o epóxi são termofixos. A união por rebites apresenta problemas no que diz respeito a continuidade das fibras de reforço e às concentrações de tensão provocadas pelo rebite. Neste caso a união das chapas por adesivos é muito eficiente, pois, permite a continuidade das fibras e permite a utilização do mesmo material da matriz como adesivo, o que garante melhor compatibilidade entre o adesivo e a superfície a ser unida.

Atualmente, os adesivos condutivos estão sendo visados como uma possível alternativa para substituir as pastas de solda convencionais na montagem de componentes eletrônicos em placas de circuito impresso (PCI), por serem menos nocivos ao meio ambiente e pela capacidade de fazer junções "fine pitch". No entanto, pouco se conhece sobre o comportamento e propriedades dos adesivos condutivos isotrópicos, na forma de pasta, na montagem de componentes eletrônicos em PCIs, que são, em geral, compósitos de resina e celulose ou de resina reforçada com fibras de vidro com uma película de cobre na superfície.

2.5.2 Soldagem por atrito

A soldagem por atrito pode ser classificada como um método de junção no estado sólido. Assim, da mesma forma que outros processos enquadrados nessa classificação ela oferece como principal vantagem, a manutenção das propriedades originais dos materiais unidos ao longo da junta, sendo ótima para a junção de materiais dissimilares.

Existem duas versões dessa soldagem: a rotacional (adequada para a união de tubos, podendo ter matriz polimérica ou metálica) e a não-rotacional: linear ou orbital (ideal para peças não circulares, como barras e forjados).

2.5.3 Soldagem por Microondas

Microondas são comumente utilizados para aquecer e fundir termoplásticos. Dependendo da frequência do campo eletromagnético e da natureza do polímero as moléculas podem ser excitadas de diferentes formas. O movimento molecular resultante causa atrito entre as moléculas e por consequência o aquecimento do material. Portanto essa técnica não pode ser utilizada com compósitos que possuam reforços que sejam bons condutores elétricos. A adição de fibras condutoras elétricas a um polímero produz um compósito muito condutor que isola a interface da junta a ser soldada do campo eletromagnético, impedindo o aquecimento da região de interesse.

A maioria dos termoplásticos não interage com microondas e, portanto, não são aquecem quando expostas à radiação. No entanto, pode-se adicionar um implante susceptível às microondas no local da junta para criar uma zona de aquecimento localizado. Podem ser empregados implantes de grafite, polímeros condutores ou metálicos.

O aquecimento do implante promove a fusão do termoplástico ao seu redor e, juntamente com a aplicação de pressão, é formada a solda.

2.5.4 Junção por difusão

O método de junção por difusão não envolve a fusão do material base. Assim, esse método é particularmente atrativo para combinações reativas como Ti/SiC e Al/B. Esse processo é adequado para unir geometrias muito complexas e seções muito finas.

As superfícies a serem unidas são limpas, geralmente com acetona para remover possíveis contaminantes, e mecanicamente lixadas, para eliminar películas de óxido. Então, as peças são colocadas em contato, uma pressão é aplicada sobre elas e calor é fornecido a elas, sob vácuo ou uma atmosfera controlada (Figura 10), dando-se condições para que a difusão no estado sólido crie uma ligação entre as peças. Em geral, a junção apresenta ótima qualidade, mas o processo é lento e requer altas temperaturas. Quanto mais fina a camada de material de preenchimento, menor será o tempo de junção a uma dada temperatura.

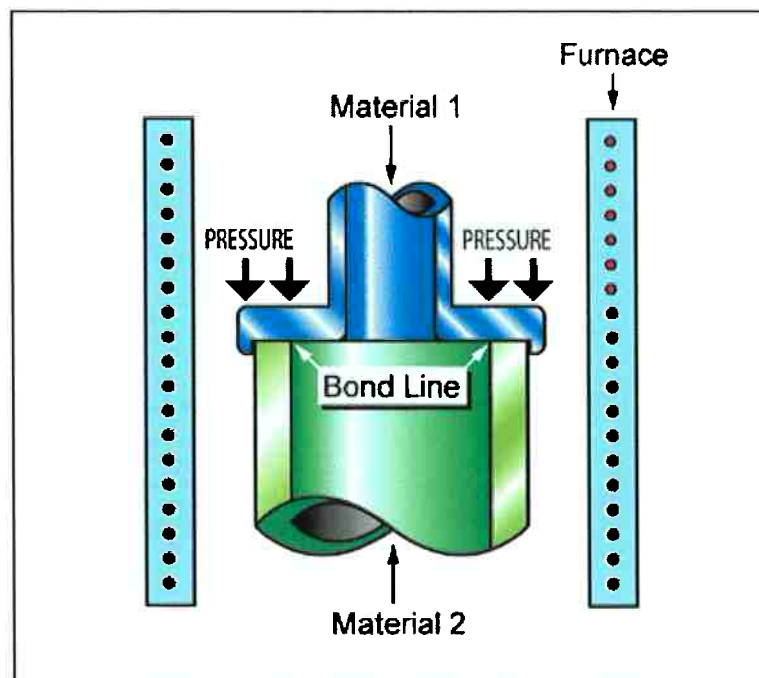


Figura 10 - Esquema da montagem para a realização da junção por difusão (extraída do Granta Software)

2.5.5 Soldagem a Laser

A soldagem a laser é um método de junção por fusão que causa a coalescência de materiais através do calor obtido da concentração de um feixe de luz monocromática e coerente (com todas as ondas de luz em fase) na região a ser soldada. Este feixe é direcionado através de espelhos planos e focado em um pequeno ponto através de lentes ou um espelho curvo.

A soldagem a laser é um processo que pode se utilizar de gás inerte para evitar a oxidação da poça de soldagem se necessário e, ocasionalmente utiliza-se de material de adição.

As principais vantagens deste processo são:

- A redução da ZAC (zona afetada pelo calor) e a minimização de deformações induzidas termicamente.
- Não requer o uso de eletrodos, deixando a solda livre de contaminação por estes.
- Não é afetada por fenômenos magnéticos.
- Pode soldar junções pequenas, devido a capacidade de concentração do laser.
- Processo automatizado.
- Pode soldar uma grande gama de materiais, inclusive compósitos e materiais isolantes e em praticamente todas as posições.

As limitações do processo são:

- O posicionamento das peças a serem soldadas deve ser extremamente preciso.
- Pode ser afetado pela alta refletividade de alguns materiais, como cobre e alumínio.
- Possui uma baixa eficiência energética.
- Baixo poder de penetração.
- O cordão possui certa porosidade e fragilidade devido à alta velocidade de solidificação.

Na soldagem de materiais compósitos de matriz polimérica, o laser é utilizado para fundir as bordas que serão soldadas, estas então são rapidamente unidas e

pressionadas uma contra a outra até que o termoplástico se resfrie e resolidifique. Em geral, é um processo muito similar a soldagem por placas aquecidas, com a exceção de que o calor é fornecido através da transformação de radiação eletromagnética em energia térmica.

Encontram-se dificuldades na realização deste processo para grandes áreas de soldagem e quando o processo não é automatizado, devido à rápida resolidificação do termoplástico. Na soldagem de pequenas áreas em processos semi-automatizados e automatizados estas dificuldades são reduzidas, permitindo o sucesso da soldagem em grande parte dos casos.

Para a soldagem de materiais compósitos de matriz metálica, a soldagem a laser tem sua excelência por minimizar a ZAC em soldas rápidas e de um único passe para placas, tubos e folhas. Porém este método é muitas vezes inadequado para a soldagem de materiais compósitos de matriz metálica devido às altas temperaturas locais na poça de fusão, que acabam por causar reações indesejadas entre a matriz e o reforço como, por exemplo, a formação de carboneto de alumínio.

2.5.6 Soldagem por Placa Aquecida

A junção de componentes a partir da técnica de placa aquecida é usualmente empregada para unir grandes peças planas ou irregulares. Basicamente uma peça metálica aquecida é aproximada das superfícies a serem unidas. O contato promove a fusão das extremidades das duas peças. Assim que a placa metálica é retirada, pressiona-se uma peça sobre a outra e ocorre a junção permanente na forma de selagem que na maioria dos casos é estanque. Normalmente as peças apresentam a linha de junção na posição vertical ou horizontal e a ferramenta metálica acompanha a topografia. O controle do tempo e da temperatura de aquecimento determina a qualidade da junção em larga escala. O tempo de ciclo é relativamente curto e assim o processo atinge alta produtividade se este for automatizado. Existe também a possibilidade de se realizar a junção em vários planos ao mesmo tempo, uma vez que as placas podem ser encaixadas entre si.

2.5.7 Soldagem por extrusão

Diversos componentes poliméricos utilizados hoje em dia em componentes de engenharia possuem formatos e geometrias complexas. Isto decorre da otimização do uso destes materiais na substituição dos componentes metálicos. Assim, em muitos casos seria impossível se produzir a peça num corpo inteiro por meio de uma operação unitária como a extrusão, sopro ou outra técnica de convencional de conformação de polímeros.

Ao contrário dos outros processos de junção de polímeros, a soldagem por extrusão une componentes dos polímeros mais comuns, independentemente da topografia da junta soldada e da sua posição no espaço. Somente polímeros termoplásticos.

A Soldagem por extrusão consiste em unir peças de material polimérico em um único passe de solda. É a técnica mais comum para unir componentes com espessuras maiores do que 6mm. A velocidade de aplicação varia entre 0,5-1,0 m/min.

2.5.8 Soldagem por ultra-som

O método de soldagem por ultra-som consiste em usar uma alta frequência de vibração para fazer com que as partes a serem soldadas aqueçam até seu amolecimento devido ao atrito. A pressão aplicada força os dois materiais um contra o outro, que são então soldados. A eficiência desse processo é um reflexo da geometria do contato entre as peças, sendo necessário que haja concentradores de calor, pequenas irregularidades na superfície da peça, por onde se realiza o aquecimento.

O equipamento de soldagem (Figura 16) consiste em uma prensa que aplica uma pressão na junta a ser soldada e um sonotrodo, elemento que aplica a o ultra-som, em uma frequência de 20 a 40kHz, criando pequenas vibrações da ordem de 20 a 100 μ m. A vibração é então transmitida através do material até o ponto de junção.

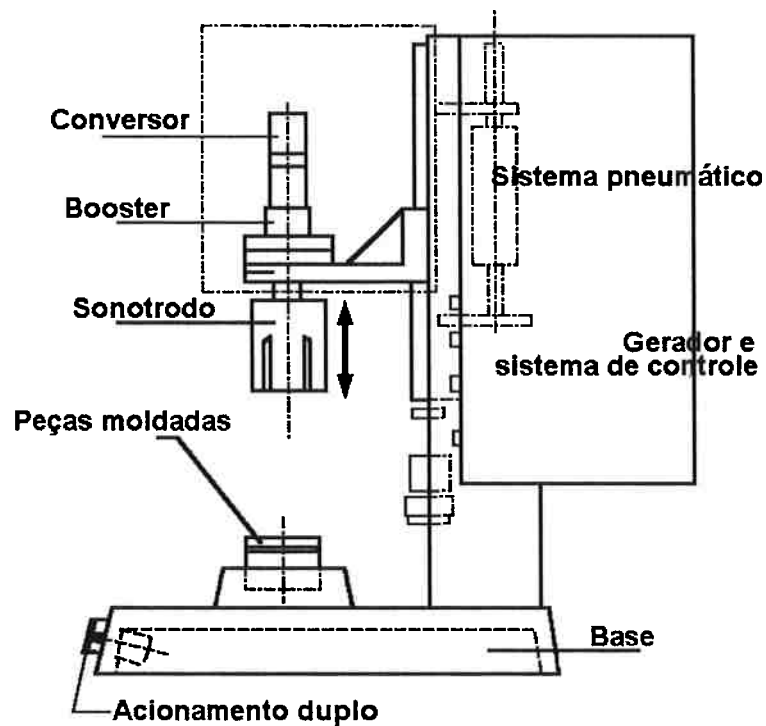


Figura 11 - Representação esquemática do equipamento de soldagem por ultra-som

Este método permite a automatização do processo, alta produtividade e geometrias de junta extremamente complexas. Além destas vantagens, em relação aos outros processos, permite utilização em materiais opacos e eliminação de elementos extras, como adesivos, implantes e elementos de fixação.

2.5.8.1 Parâmetros de soldagem por ultra-som

Os principais parâmetros que podem variar em soldagem por ultra-som e serão discutidos a seguir:

- i. Freqüência de vibração: utilizam-se valores entre 10 a 40 kHz. Não é comum poder-se alterar esse parâmetro nos equipamentos de solda, sendo geralmente fixo em 20 ou 40kHz.
- ii. Amplitude de vibração: geralmente utilizam-se valores entre 10 a 30 μm para polímeros amorfos e 25 a 50 μm para polímeros

semicristalinos. A amplitude de vibração pode ser alterada pelas geometrias do sonotrodo e do conversor (booster).

- iii. Pressão de soldagem: indica a pressão normal à interface sonotrodo-junta. Pressões de soldagem muito elevadas levam a expulsão de material da região unida e orientação molecular desfavorável. Pressões de soldagem muito baixas ocasionam a má fricção entre as superfícies, resultando em regiões não soldadas.
- iv. Tempo de soldagem: é um parâmetro que tem influência direta na qualidade da solda. Pode variar de alguns milissegundos até alguns segundos. Tempos de soldagem muito elevados resultam em expulsão de material da região unida e degradação do polímero. Tempos de soldagem muito baixos ocasionam baixa temperatura na superfície a ser soldada e, portanto, na não união dos materiais.
- v. Tempo de recalque: indica o tempo que o sonotrodo permanece pressionando a junta para que o polímero resfrie, após o tempo de soldagem. Este valor é geralmente inferior a 1 segundo.
- vi. Geometria da junta: é um parâmetro importante, uma vez que a energia de vibração deve ser transmitida do sonotrodo até a interface da junta. Dependendo da distância do sonotrodo à junta o processo é classificado como "near-field" (campo-próximo, até 6mm de distância) ou "far-field" (campo-distante, distâncias superiores a 6mm).

É comum a utilização de diagramas bidimensionais, onde se estuda a variação da qualidade da junta em relação a dois parâmetros, mantendo-se os demais constantes. A região do diagrama que contém as combinações de parâmetros para os quais a solda foi satisfatória é chamada de janela operacional. A Figura 12 ilustra um diagrama de janela operacional para pressão de soldagem com tempo de soldagem. A definição de uma solda satisfatória ou não é definida e deve ser adotada conforme a solicitação de sua aplicação.

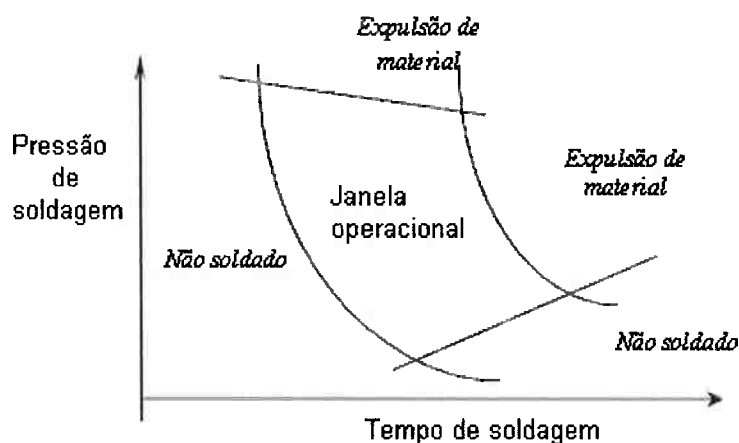


Figura 12 - Esquema de um diagrama de janelas operacionais

2.6 Soldabilidade

A American Welding Society (AWS) define soldabilidade como “a capacidade de um material ser soldado nas condições de fabricação impostas por uma estrutura projetada de forma adequada e de se comportar adequadamente em serviço”.

Para cada material e método de soldagem existem diferentes fatores que influenciam na soldabilidade desse material.

2.6.1 Soldabilidade de polímeros por ultra-som

A soldabilidade de um material por ultra-som é dependente de diversos parâmetros, sendo proporcional ao módulo de elasticidade, a condutividade térmica, e o coeficiente de atrito. É inversamente proporcional a densidade, ao calor específico e à temperatura de fusão. Também se deve considerar a geometria da junta e sua distância em relação ao sonotrodo. No caso de um compósito, as fases terão um valor diferente para cada um desses parâmetros, podendo ocorrer uma fusão preferencial. Deve se tomar cuidado também como está disposto o reforço, uma vez que fatores como continuidade ou não do reforço, orientação de fibras e tipo de material que constitui o reforço pode causar uma distorção em como a onda se propaga dentro do material. Como esse método envolve a fusão do material para que a soldagem seja realizada, só é

possível soldar polímeros termoplásticos, uma vez que os termofixos se degradarão antes de fundirem.

Podem-se esperar boas propriedades em soldas de polímeros que possuam elevado módulo de cisalhamento elástico e baixo fator de perda mecânica. A Figura 13 ilustra o comportamento típico destes parâmetros para polímeros amorfos. Observa-se que estes valores são constantes e favoráveis até a temperatura de transição vítrea, quando o material sofre amolecimento e pode ser soldado.

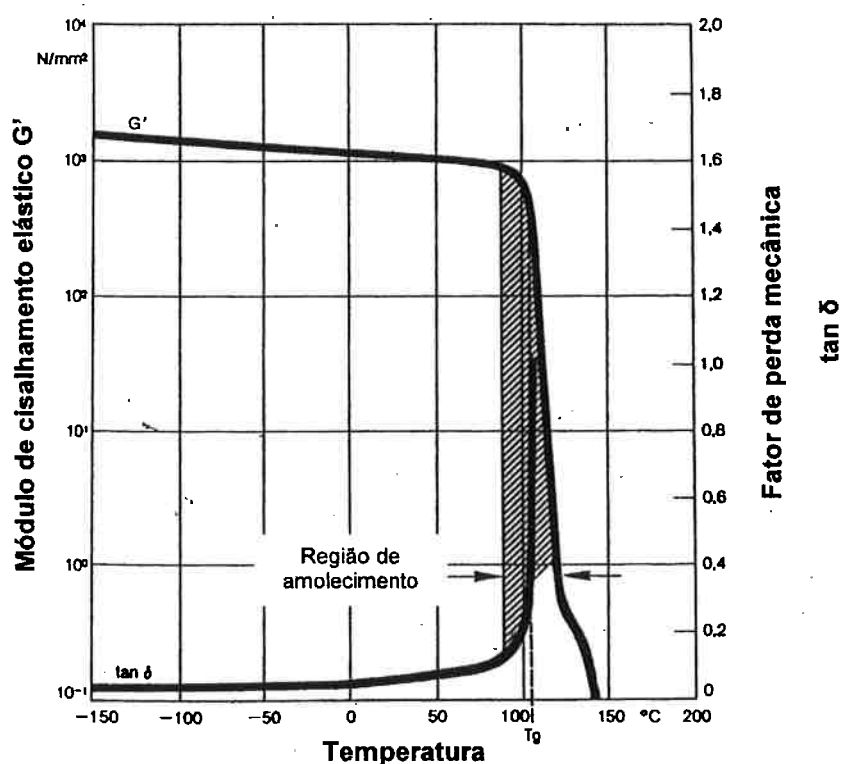


Figura 13 - Comportamento térmico do módulo de cisalhamento e do fator de perda mecânica para um polímero amorfo [14]

No caso de polímeros semicristalinos, o amolecimento ocorre em duas etapas. A Figura 14 ilustra o comportamento típico destes parâmetros para polímeros semicristalinos. Após atingir a T_g , o polímero sofre amolecimento de sua porção amorfa, portanto, queda no módulo de cisalhamento elástico e elevação no fator de perda mecânica. Uma vez que a atenuação do ultra-som é

maior nesses materiais, geralmente é necessária maior energia de soldagem para polímeros semicristalinos.

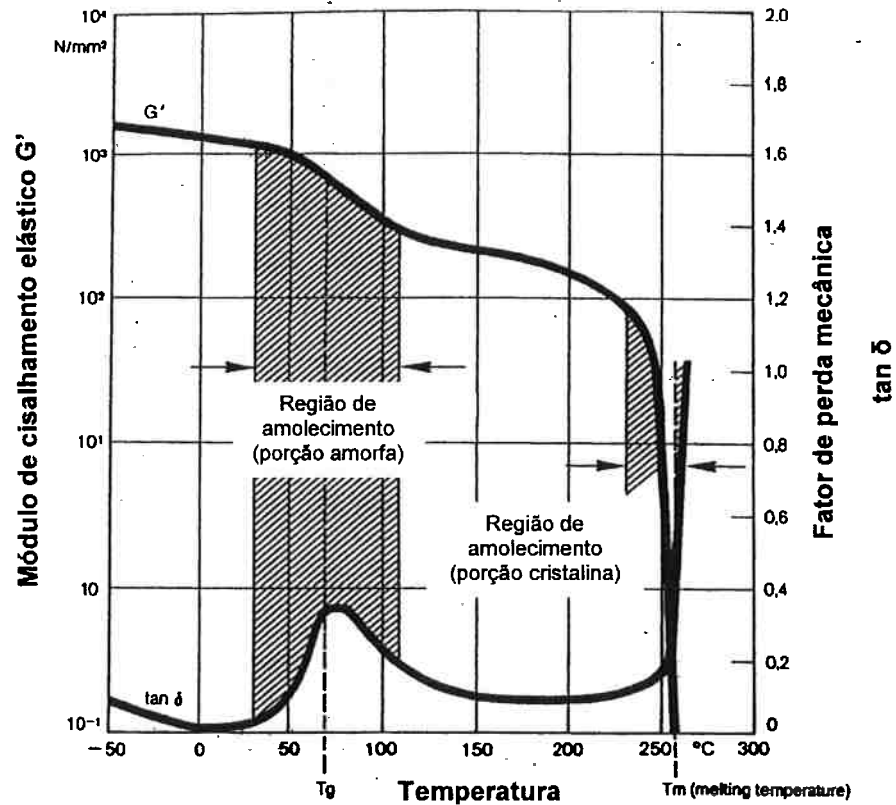


Figura 14 - Comportamento térmico do módulo de cisalhamento e do fator de perda mecânica para um polímero semicristalino [14]

2.6.2 Soldabilidade do nylon por ultra-som

Por ser um polímero termoplástico, o nylon permite a utilização de métodos de soldagem por elevação da temperatura, como na soldagem por ultra-som. Porém, a soldabilidade de polímeros semicristalinos, como o nylon, é inferior à dos polímeros amorfos. Isto se dá porque estes polímeros são maus condutores de ultra-som. Também, devido aos polímeros semicristalinos terem uma temperatura de fusão bem definida, o material fundido pode se solidificar a medida que escorre para uma região fria da junta. Essa junção parcial é forte o suficiente para impedir fricção de superfícies para a refusão do material nesta

região, mas fraca em relação à qualidade esperada da junção. Desta forma, os polímeros semicristalinos normalmente só podem ser soldados em “near-field”, ou seja, o sonotrodo não deve ficar mais de 6mm distante da junta a ser soldada. De forma geral, polímeros semicristalinos necessitam de maior energia de soldagem em relação aos amorfos.

O nylon possui característica higroscópica, por isso deve ser soldado imediatamente após a injeção ou ser seco em estufa a 80°C por 4 horas para se evitar a liberação de vapor durante a soldagem.

Como a maioria dos polímeros, o nylon possui temperatura de oxidação próxima à sua temperatura de fusão. Segundo S. V. Levchik e G. F. Levchik [12], o nylon 6 oxida-se rapidamente a partir dos 260°C, com liberação de CO₂, e se degrada rapidamente por despolimerização a partir dos 360°C.

Turri, W. F., Brandi, S. D. e Demarquette, N. R. [13] obtiveram ciclos térmicos para o PMMA com tempo de soldagem de 0,7s, indicando que a temperatura no momento da soldagem pode ser superior a 400°C.

A oxidação e degradação do nylon resultam em poros e perdas nas propriedades mecânicas na região unida. Para se evitar a oxidação e degradação do material, podem-se ser utilizadas temperaturas baixas na soldagem (apenas o suficiente para a fusão do polímero) ou estabilizantes térmicos para o nylon.

2.6.3 Soldabilidade de nylon reforçado por fibra de vidro

Cargas e reforços podem ter grande influência na qualidade da junção realizada por ultra-som.

Reforços modificam propriedades do material que tem direta relação com a soldabilidade, como o módulo de elasticidade, a capacidade térmica, a densidade e a condutividade térmica.

No caso do nylon reforçado por fibra de vidro, é esperado o aumento no módulo de elasticidade, a diminuição da capacidade térmica e o aumento na densidade.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Análise térmica DSC

Differential Scanning Calorimetry, calorimetria exploratória diferencial ou simplesmente DSC, é uma técnica termoanalítica que se baseia na quantidade de calor necessária para aquecer um dado material. Nesta técnica o material estudado e um material de referência são aquecidos a uma taxa constante, obtendo-se a diferença de energia necessária para aquecer os materiais em função da temperatura.

O material de referência deve possuir capacidade térmica conhecida e deve ser escolhido de forma a atender três requisitos:

- (i) Não deve sofrer eventos térmicos (tais como: decomposição, fusão, oxidação) na faixa de temperaturas analisada.
- (ii) Não deve reagir com o suporte de amostras e com o termopar.
- (iii) A capacidade térmica e a condutividade térmica devem ser semelhantes ao da amostra a ser analisada.

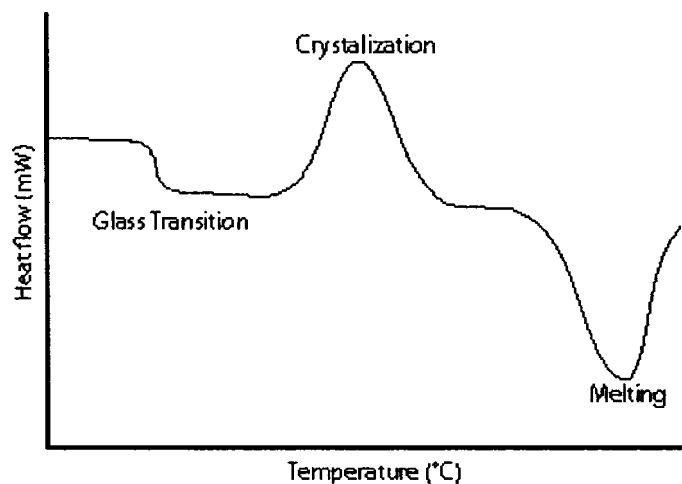
Esta técnica é particularmente útil na obtenção da temperatura nas quais os eventos térmicos ocorrem para um determinado material.

A Tabela 6 exibe os principais eventos térmicos que podem ser determinados por DSC.

Durante um evento térmico, o material absorve ou libera energia na forma de calor, dessa forma a energia necessária para aquecer a amostra é drasticamente alterada em relação à energia necessária para aquecer o material de referência. A Figura 15 exemplifica como alguns de eventos térmicos são apresentados no DSC.

Tabela 6 - Principais eventos térmicos

$A(s_1) \rightarrow A(s_2)$	transformação de fase
$A(s_1) \rightarrow A(l)$	fusão
$A(s_1) \rightarrow A(g)$	sublimação
$A(s_1) \rightarrow A(s) + \text{gases}$	decomposição
$A(s_1) \rightarrow \text{gases}$	decomposição
$A(\text{vítreo}) \rightarrow A(\text{viscoso})$	transição vítrea
$A(s) + B(g) \rightarrow C(s)$	oxidação / corrosão
$A(s) + B(g) \rightarrow \text{gases}$	combustão / volatilização
$A(s) + (\text{gases})_1 \rightarrow A(s) + (\text{gases})_2$	catálise heterogênea
$A(s) + B(s) \rightarrow AB(s)$	adição
$AB(s) + CD(s) \rightarrow AD(s) + CB(s)$	decomposição dupla

**Figura 15 - Exemplo de resultado de DSC [9]**

Nesse exemplo reações exotérmicas resultam em máximos no gráfico e reações endotérmicas resultam em mínimo, mas isto não é uma regra uma vez que a definição da diferença de calor cedido à amostra e à referência é arbitrária.

Note que para alguns eventos térmicos, como para a transição vítrea, não há variação de entalpia no material, porém existe uma alteração na capacidade térmica, resultando na alteração da linha de base na vertical.

Foram realizados ensaios de DSC para os três tipos de matérias em atmosfera de nitrogênio com taxa de aquecimento de 10°C/min. O elemento de referencia utilizado foi o alumínio. Os gráficos de fluxo de calor versus temperatura (modelo ilustrado na Figura 15), bem como a T_g e T_m foram obtidas com o auxílio do software MatLab

3.2 Equipamento de soldagem por ultra-som

O equipamento utilizado para soldagem dos corpos de prova foi o Branson 920iw Ultrasonic Welder, localizado no departamento de junção do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da EPUSP. Este equipamento permite realizar junções soldadas por ultra-som variando-se a pressão de soldagem, o tempo de soldagem, o tempo de recalque e a amplitude da onda se mantém a 20kHz. As características do equipamento estão detalhadas na Tabela 7

Tabela 7 - Especificações do equipamento de soldagem [10]

Alimentação	200-245V AC, 1Ø, 13 amps		
Potência	2000 watts		
Gatilho dinâmico	10 a 200 lbs. (67 a 890 N) máx.		
Curso de soldagem	4" (102 mm)		
Peso	145 lbs. (66 kg)		
Tempo de soldagem	50 a 10000 milisegundos	passo	10 milisegundos
Tempo de recalque	50 a 10000 milisegundos	passo	1 milisegundo



Figura 16 - Equipamento de soldagem utilizado



Figura 17 - Detalhe das garras de soldagem

3.3 Sonotrodo utilizado

O sonotrodo utilizado está ilustrado na Figura 18 (código ETI S4999 TUR). As dimensões indicadas são $D_1=38\text{mm}$, $D_2=20\text{mm}$ e $L_s=12,5\text{mm}$, base quadrada e lisa. O sonotrodo é responsável por amplificar ou reduzir a amplitude da onda de vibração, pressionar a junta e transmitir a vibração para a amostra. A amplificação pode ser obtida pela expressão:

$$A = \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2$$

Portanto, a taxa de ampliação obtida por esse sonotrodo é $A= 3,61$.

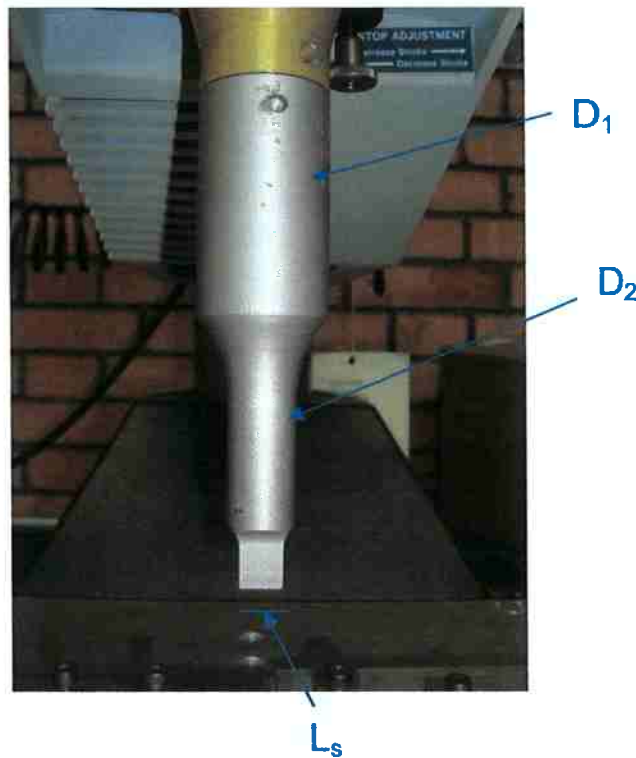


Figura 18 - Detalhe do sonotrodo utilizado

3.4 Corpos de prova

O material utilizado foi fornecido pela Radici Plastics de Araçariguama. As amostras foram divididas em 3 grupos. O primeiro, do tipo "A" é composto de Nylon-6 sem nenhum tipo de carga. O material do tipo "B" contém 15% em massa de fibra de vidro. Finalmente, os corpos do tipo "C" contêm 50% em massa de fibra de vidro.

As fibras de vidro foram moídas e misturadas ao polímero durante a injeção, portanto, não é esperado que exista uma direção preferencial de alinhamento das fibras.

Os corpos de prova possuem espessura de 4mm e estão ilustrados na Figura 19.



Figura 19 - Corpos de prova

3.5 Caracterização da quantidade de fibras.

Duas amostras de cada tipo de material foram queimadas a 800°C por 1 hora a fim de se obter a porcentagem de fibras. Foi considerado que o resíduo era composto apenas de fibras de vidro e a diferença entre o resíduo e a massa inicial como sendo a massa da matriz de nylon. Para o cálculo da fração em volume utilizou-se a fração em massa e a densidade de 1,13 g/cm³ (Tabela 2) para o nylon e de 2,50 g/cm³ (Tabela 3) para o vidro.

3.6 Geometria da junta

A geometria da junta utilizada está esquematizada na Figura 20. O sonotrodo encosta na parte superior da peça na região sobreposta. A área total, que se espera estar unida após o processo de soldagem, é de $1,27 \text{ cm}^2$, limitada pela largura do corpo de prova e a profundidade do sonotrodo e que corresponde à toda área sobreposta.



Figura 20 - Esquema da geometria da junta

Pode-se observar que a distância entre o sonotrodo e a junta é de 4mm, ou seja, pode-se considerar este processo no campo próximo.

3.7 Caracterização da microestrutura

As mostras foram resfriadas com nitrogênio líquido e fraturadas para análise ao microscópio eletrônico de varredura por elétrons secundários. Foram obtidas imagens com 500 vezes de ampliação para os três tipos de material.

3.8 Janelas operacionais de soldagem por ultra-som

Para a obtenção da janela operacional estimada, as amostras foram soldadas por ultra-som e verificou-se visualmente a porcentagem unida em relação à área sobreposta total. Os parâmetros constantes foram: o tempo de recalque (0,4s) a área sobreposta, a posição das garras e o aperto das amostras superior e inferior (0,4 N.m de torque em cada parafuso, obtido por meio de um torquímetro). As variáveis do ensaio foram: o tempo e a pressão de soldagem. A junta foi considerada satisfatória se a porcentagem unida fosse igual ou superior a 50% e que não houvesse excessiva expulsão de material ou degradação do mesmo.

Foram traçados os gráficos de pressão da soldagem versus tempo de soldagem com os respectivos valores de porcentagem unida. Os pontos em azul são de juntas satisfatórias, os pontos em vermelho são de juntas não satisfatórias, tanto por terem baixa porcentagem unida ou por apresentarem alta degradação\expulsão de material, indicado por (deg) ou escorregamento do corpo devido à baixa pressão exercida pelo sonotrodo, indicado por (esc). As fronteiras das janelas operacionais foram traçadas de forma a garantir que os pontos de solda não satisfatória ficassem fora da janela.

3.9 Tensões máximas de cisalhamento das juntas

Com base nas janelas operacionais obtidas, foram selecionados 4 pontos para amostras A e B e 6 pontos para amostras C para ensaios de cisalhamento da solda.

Os ensaios de cisalhamento foram realizados utilizando-se o dispositivo da Figura 21, que permite que a tensão aplicada se concentre na solda, evitando que a peça rompa em outros pontos devido à concentração de tensões. Este dispositivo foi desenvolvido e utilizado por Joelmir de Souza[8] em seu mestrado com o mesmo propósito.

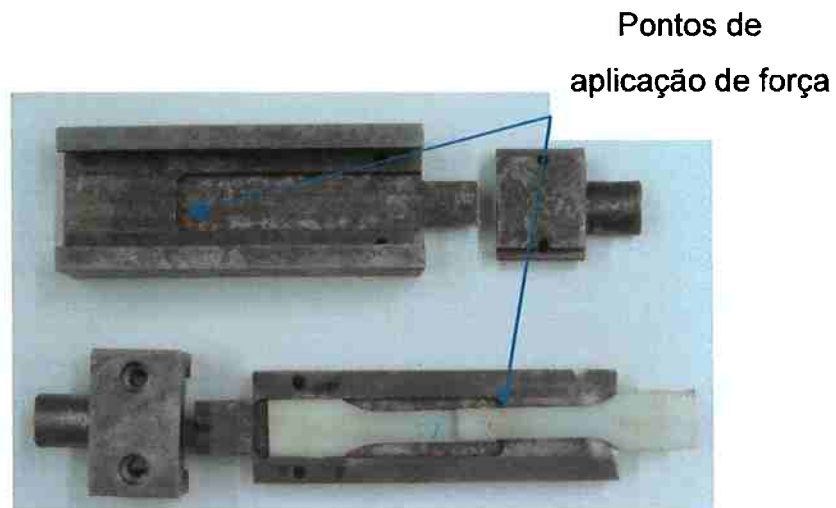


Figura 21 - Dispositivo para ensaio de cisalhamento

As superfícies fraturadas foram fotografadas e as áreas efetivamente unidas foram obtidas com a ajuda do software AxioVision.

3.10 Análise da fratura da solda

Selecionaram-se algumas amostras soldadas por ultra-som e fraturadas manualmente para análise da fratura da superfície unida por meio de microscopia eletrônica de varredura por elétrons secundários. Foram obtidas micrografias com 120 vezes de aumento para todos os tipos de material e com 250 vezes de aumento para o material C.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização da Tm e Tg do nylon

. A Figura 22 apresenta o resultado da análise de DSC para o material do tipo A.

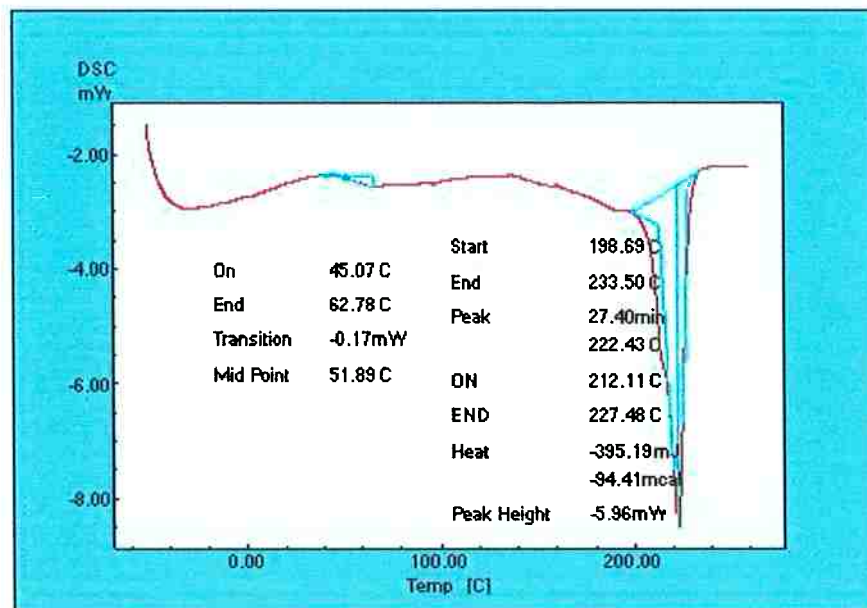


Figura 22 - DSC de uma amostra do tipo A

. A Figura 23 apresenta o resultado da análise de DSC para o material do tipo B.

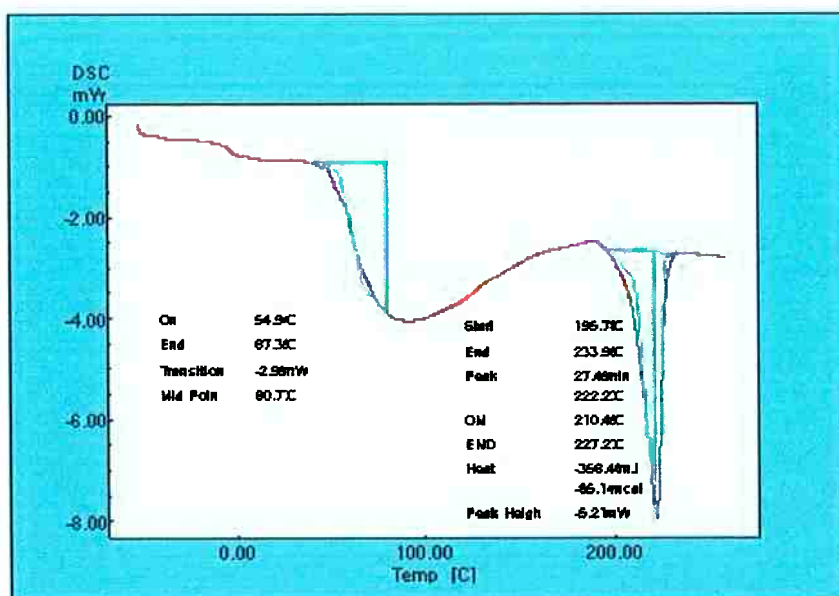


Figura 23 - DSC de uma amostra do tipo B

. A Figura 24 apresenta o resultado da análise de DSC para o material do tipo C.

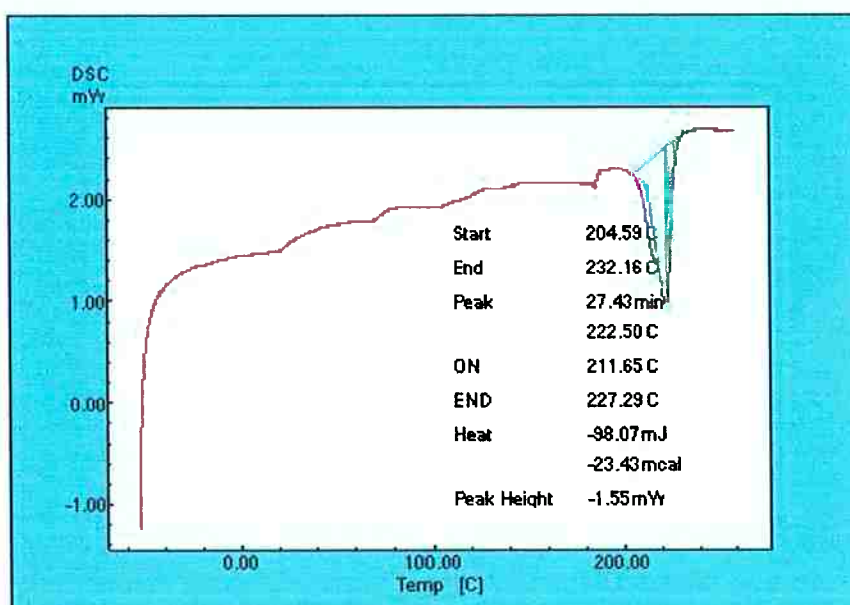


Figura 24 - DSC de uma amostra do tipo C

Observa-se pela Figura 24 que não foi possível se obter a Tg para materiais do tipo C, pois o gráfico de fluxo de calor versus temperatura não apresenta um declive significativo, como esperado. Qualitativamente, observa-se que o calor específico do

significativo, como esperado. Qualitativamente, observa-se que o calor específico do material é inversamente proporcional à fração de fibra (a linha de base se torna mais positiva conforme a fração de fibra é maior). Isto é coerente com a literatura, uma vez que o calor específico do vidro (por volta de 0,2 cal/g°C [5]) é inferior ao do Nylon (por volta de 0,4 cal/g°C, [7]), portanto o compósito terá menor calor específico se tiver maior fração de fibras.

Tabela 8 - Temperaturas de transição vítrea e fusão da matriz para os três tipos de materiais

	A		B		C	
Tg (°C)	61,36	51,89	60,77	40,03	-	-
Tm (°C)	223,2	222,43	222,23	221,65	222,65	222,5

4.2 Caracterização das porcentagens de fibra

O resultado dos ensaios de caracterização está na Tabela 9. Observa-se que os valores estão condizentes com os nominais.

Tabela 9 - Caracterização de quantidade de fibra

Amostra	Massa da amostra (g)	Massa do resíduo (g)	Fração de fibra em massa	Porcentagem de fibra em massa	Fração de fibra em volume	Porcentagem de fibra em volume
A1	3.5784	-0.0080	-0.0022	0.0	-0.0010	0.0
A2	6.3740	-0.0070	-0.0011	0.0	-0.0005	0.0
B1	3.9633	0.6192	0.1562	15.6	0.0772	7.7
B2	6.9187	1.0856	0.1569	15.7	0.0776	7.8
C1	5.1140	2.5227	0.4933	49.3	0.3056	30.6
C2	8.4499	4.1944	0.4964	49.6	0.3082	30.8

4.3 Caracterização da microestrutura

A Figura 25 apresenta a micrografia da fratura para uma amostra do tipo A com elétrons secundários e 500 vezes de aumento.

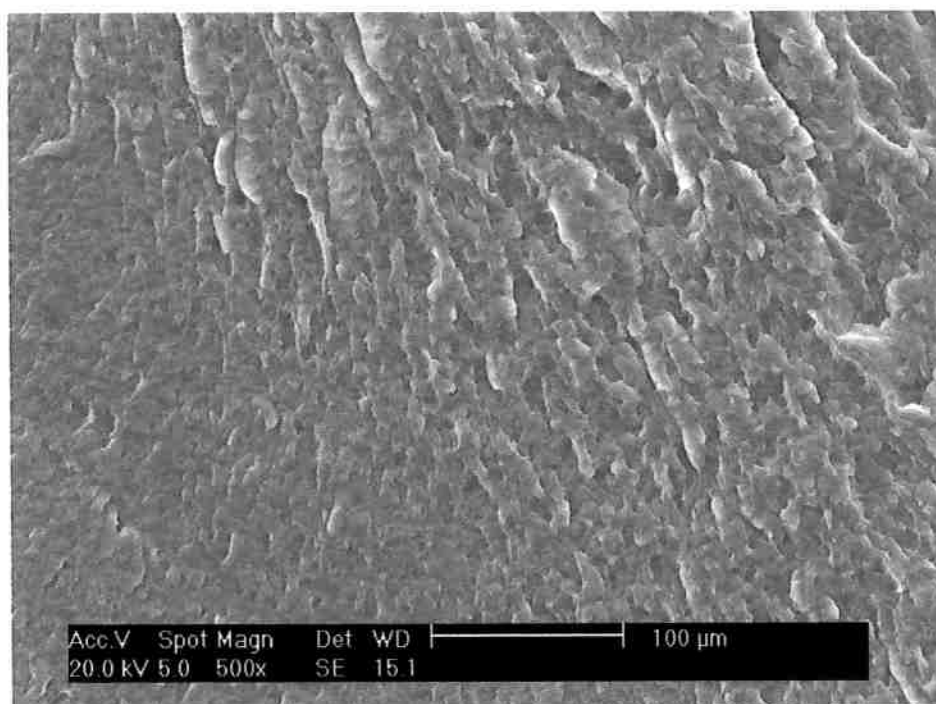


Figura 25 - Micrografia de uma amostra do tipo A

A Figura 26 apresenta a micrografia da fratura para uma amostra do tipo B com elétrons secundários e 500 vezes de aumento.

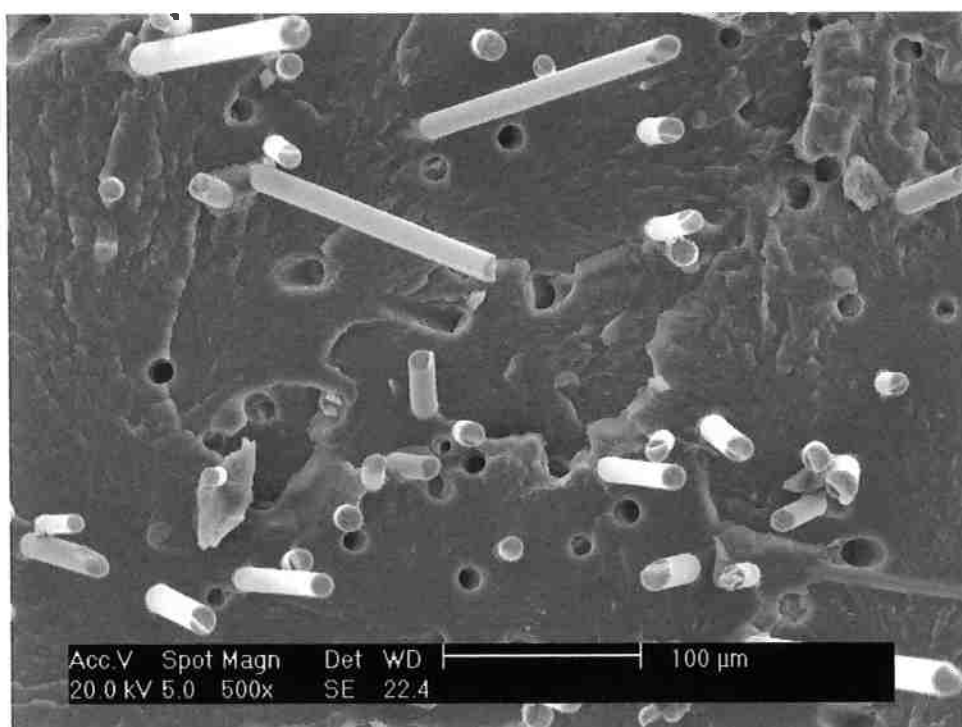


Figura 26 - Micrografia de uma amostra do tipo B

A Figura 27 apresenta a micrografia da fratura para uma amostra do tipo C com elétrons secundários e 500 vezes de aumento.

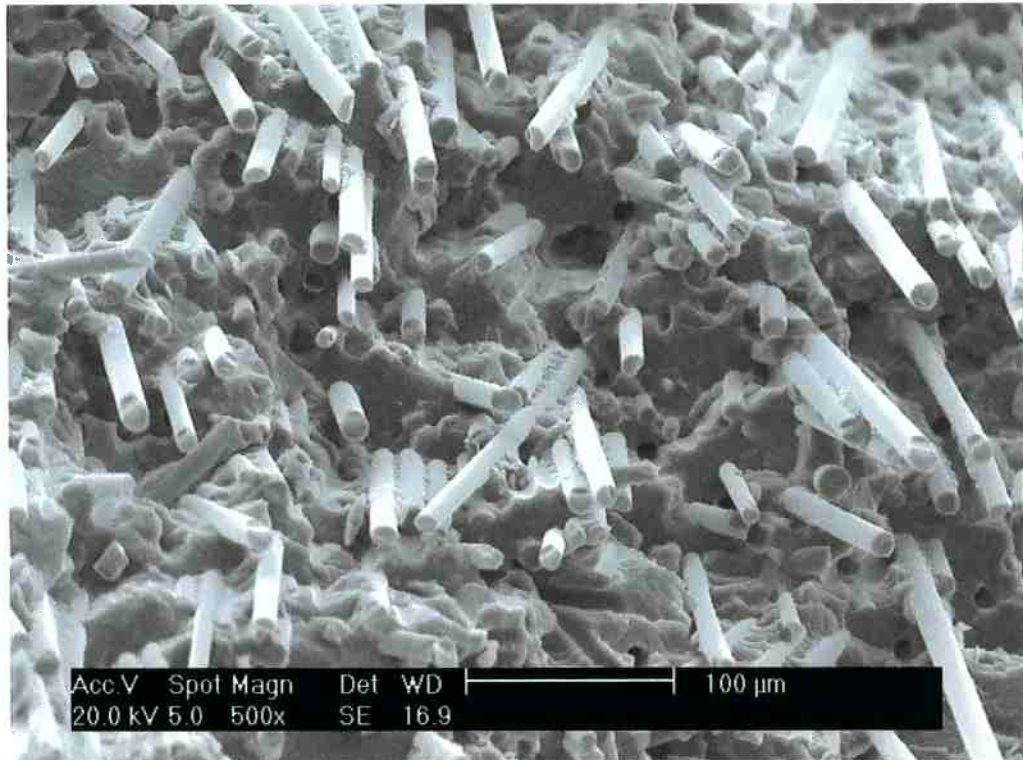


Figura 27 - Micrografia de uma amostra do tipo C

4.4 Ensaio de tração dos materiais

A Tabela 10 contém os limites de escoamento e limite de resistência, obtidos por meio de ensaios de tração para cada tipo de material.

Tabela 10 - Resultados dos ensaios de tração

Material	A	B	C
Limite de escoamento (MPa)	45	80	159
Limite de resistência (MPa)	não rompe	87	167

Os valores obtidos de limite de resistência estão consistentes, pois os valores esperados para esses materiais são 76, 103 e 190 MPa para nylons com teores de fibra 0, 15 e 50% respectivamente [5].

4.5 Obtenção das janelas operacionais

Os resultados dos ensaios estão dispostos nas tabelas Tabela 11, Tabela 12 e Tabela 13.

Tabela 11 - Áreas soldadas - Amostras A

Ensaio	Tempo de soldagem (s)	Pressão de soldagem (kPa)	Porcentagem Unida (%)	observações
1	0.1	53	5	
2	0.2	53		Quebrou fora da solda
3	0.15	53	30	
4	0.175	53	20	
5	0.185	53	40	
6	0.25	53	50	
7	0.4	53	80	Início da expulsão de material e degradação
8	0.6	53	100	
9	0.5	53	90	
10	0.3	107		Quebrou fora da solda
11	0.3	214	100	
12	0.3	285	100	
13	0.3	356		Quebrou fora da solda
14	0.15	356		Quebrou fora da solda
15	0.15	214		Quebrou fora da solda
16	0.15	178		Quebrou fora da solda
17	0.1	356	70	
18	0.05	356	40	
19	0.05	285	10	
20	0.4	214	100	Início de degradação
21	0.4	36	80	escorregamento

Tabela 12 - Áreas soldadas - Amostras B

Ensaio	Tempo de soldagem (s)	Pressão de soldagem (kPa)	Porcentagem Unida (%)	observações
1	0.1	125	0	
2	0.2	125	5	
3	0.3	125	10	
4	0.3	125	20	
5	0.3	178	50	
6	0.3	214	60	
7	0.3	285	60	
8	0.3	356	60	
9	0.3	214	70	
10	0.4	214	70	
11	0.4	214	80	
12	0.3	71	5	
13	0.295	143	20	
14	0.35	143	30	
15	0.4	143	80	
16	0.45	143	100	
17	0.475	143	80	
18	0.5	143	90	Alta degradação
19	0.4	107	80	
20	0.4	178	90	
21	0.4	214	90	
22	0.4	249	90	
23	0.45	249	100	
24	0.45	285	90	
25	0.475	285	90	
26	0.5	285	90	
27	0.55	285	100	Alta degradação
28	0.525	285	95	Início da degradação
29	0.2	285	40	
30	0.6	356	100	
31	0.65	356	100	
32	0.7	356	100	Alta degradação
33	0.7	107	100	Alta degradação
34	0.7	71	90	Alta degradação
35	0.6	53	80	Início degradação
36	0.5	53	80	
37	0.4	53	70	
38	0.35	53	60	
39	0.3	53	50	
40	0.25	53	40	
41	0.2	53	30	
42	0.225	53	30	
43	0.4	36	70	Deslizamento e degradação
44	0.2	36	70	
45	0.5	71	80	Expulsão de material e início de degradação

Tabela 13 - Áreas soldadas - Amostras C

Ensaio	Tempo de soldagem (s)	Pressão de soldagem (kPa)	Porcentagem Unida (%)	observações
1	0.1	125	1	
2	0.2	125	10	
3	0.3	125	30	
4	0.3	71	50	
5	0.3	71	50	
6	0.1	392	20	
7	0.3	71	50	
8	0.3	214	Quebrou fora da solda	
9	0.4	214	100	Expulsão de material
10	0.2	214	80	Expulsão de material
11	0.2	214	20	Não uniu
12	0.2	214	70	
13	0.15	285	20	
14	0.25	285	100	
15	0.275	285	70	
16	0.275	285	80	
17	0.275	214	90	
18	0.275	249	95	
19	0.275	178	30	
20	0.3	178	Quebrou fora da solda	
21	0.3	196	100	
22	0.275	196	30	
23	0.285	196	80	
24	0.29	196	20	
25	0.29	196	95	
26	0.295	196	100	
27	0.295	214	85	
28	0.295	178	80	
29	0.295	160	90	
30	0.295	143	Quebrou fora da solda	
31	0.325	71	70	Expulsão de material e degradação
32	0.325	178	90	Expulsão de material e alta degradação
33	0.3	36	30	Início de degradação e expulsão de material
34	0.35	36	90	Expulsão de material e alta degradação
35	0.4	36	100	Alta degradacao e expulsão de material
36	0.2	285	70	Início de degradação e expulsão de material
37	0.35	249	100	Expulsão de material
38	0.3	321	100	Expulsão de material e início de degradação
39	0.2	285	50	
40	0.2	285	100	
41	0.2	285	50	
42	0.175	285	50	

Ensaio	Tempo de soldagem (s)	Pressão de soldagem (kPa)	Porcentagem Unida (%)	observações
43	0.175	214	50	
44	0.175	143	20	
45	0.16	143	40	
46	0.16	214	40	
47	0.16	285	50	
48	0.15	285		
49	0.15	249	40	
50	0.25	71	30	

A Figura 28 mostra a janela operacional obtida pelo método, para materiais do tipo A.

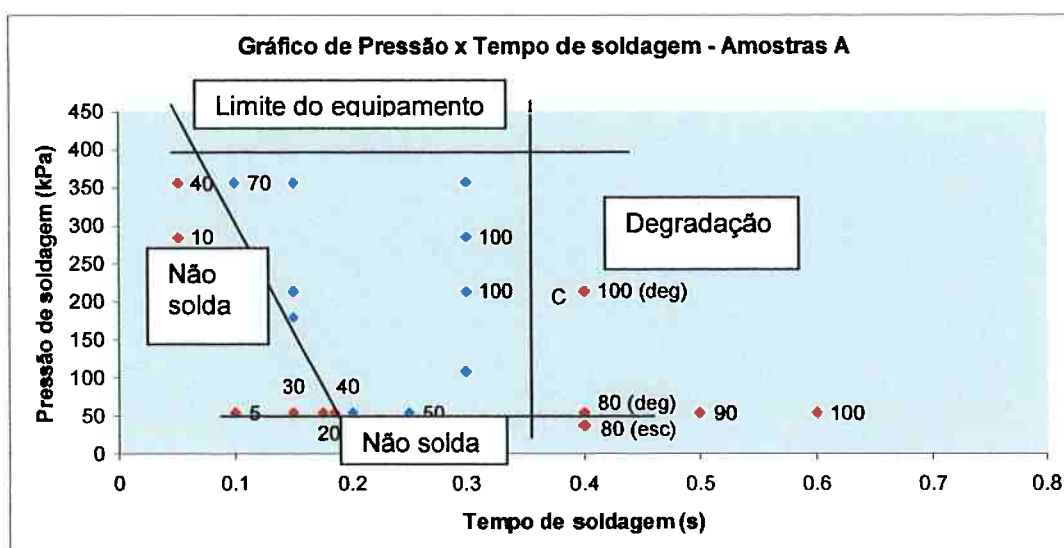


Figura 28 - Janela operacional - Material tipo A

A Figura 29 mostra a janela operacional obtida pelo método, para materiais do tipo B.

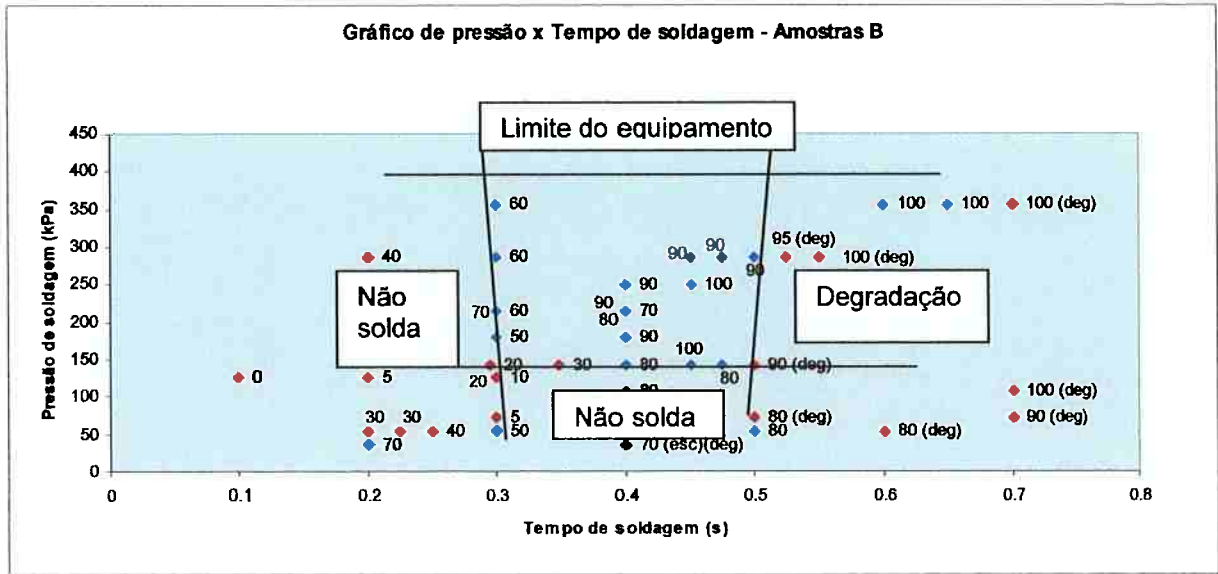


Figura 29 - Janela operacional – Material tipo B

A Figura 30 mostra a janela operacional obtida pelo método, para materiais do tipo C.

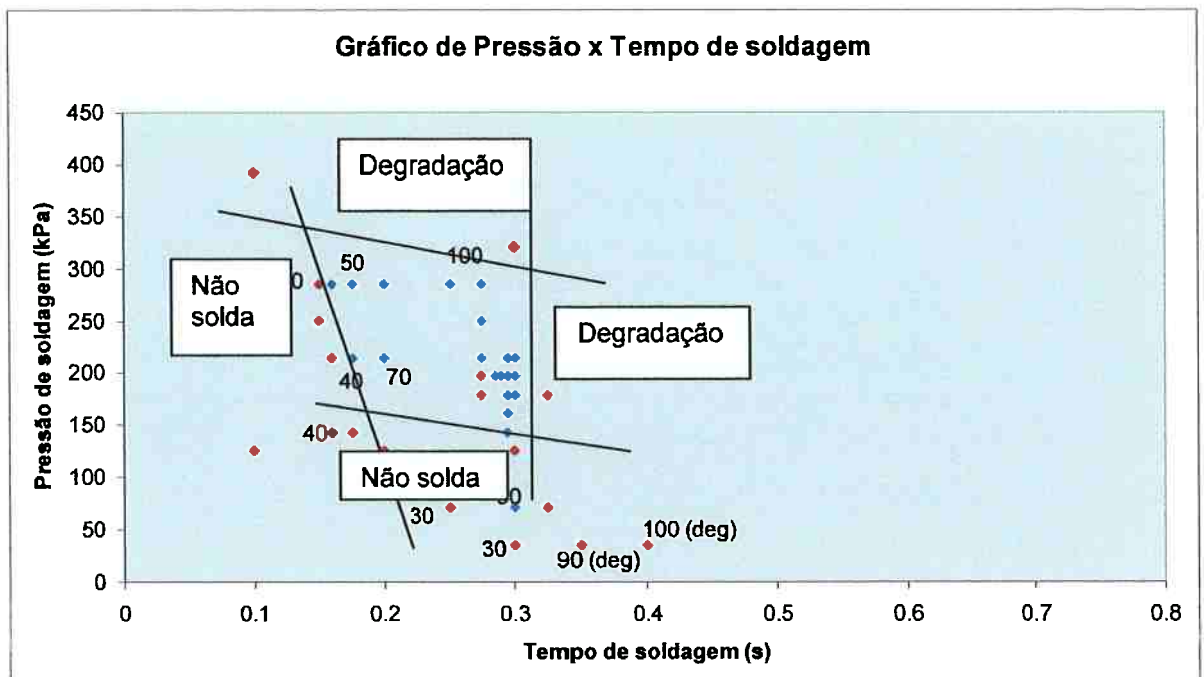


Figura 30 - Janela operacional - Material tipo C

4.6 Parâmetros para ensaio de cisalhamento

Os parâmetros selecionados para realização dos ensaios de cisalhamento da solda estão dispostos na Tabela 14.

Tabela 14 - Parâmetros selecionados para ensaio de cisalhamento

Ensaio	Tempo de soldagem (s)	Pressão de soldagem (kPa)
A ₁	0.25	214
A ₂	0.15	356
A ₃	0.15	178
A ₄	0.3	107
B ₁	0.45	143
B ₂	0.3	71
B ₃	0.4	356
B ₄	0.2	107
C ₁	0.4	214
C ₂	0.2	107
C ₃	0.15	356
C ₄	0.25	285
C ₅	0.3	178
C ₆	0.295	143

4.7 Calculo da área soldada

A Figura 31 ilustra o resultado de uma solda fraturada, cuja área foi calculada para obtenção das tensões máximas de ruptura.

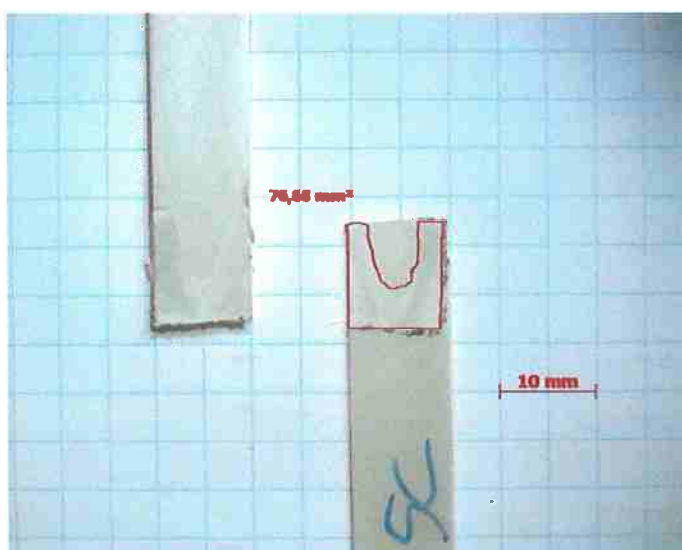


Figura 31 - Foto da região unida após ensaio de cisalhamento

4.8 Tensão máxima de cisalhamento das soldas

A Tabela 15 contém os resultados dos ensaios de cisalhamento das amostras. Os valores que não estão presentes não puderam ser obtidos por falha no equipamento ou erro de montagem.

Tabela 15 - Tensões máximas de cisalhamento das soldas

Amostra	Tempo de soldagem (s)	Pressão de soldagem (kPa)	Área unida (mm ²)	Força máxima (N)	Tensão máxima (MPa)
A ₁	0.25	214	115.62	1702	14.6
A ₂	0.15	356	91.51	1710.37	33.9
A ₃	0.15	178	59.65	-	-
A ₄	0.3	107	115.94	3482.46	33.8
B ₁	0.45	143	100.12	-	-
B ₂	0.3	71	76.69	1249.39	16.3
B ₃	0.4	356	101.9	-	-
B ₄	0.2	107	68.81	2081	30.2
C₁	0.4	214	116.35	4712.17	40.5
C ₂	0.2	107	50.52	-	-
C ₃	0.15	356	75.06	1616.16	21.5
C ₄	0.25	285	103.1	3340.2	32.4
C ₅	0.3	178	76.68	-	-
C ₆	0.295	143	96.98	2893.01	29.8

Observa-se que a amostra C₁ apresentou maior tensão máxima de cisalhamento dentre todas as amostras medidas.

4.9 Fractografia das juntas soldadas

A Figura 32 apresenta a micrografia da fratura da região soldada de uma amostra do tipo A, realizada por microscopia eletrônica de varredura com elétrons secundários. Pode-se observar à esquerda da figura uma morfologia típica de espumas sólidas fraturadas. À direita observa-se uma morfologia de fratura semelhante à obtida pela fratura do material sem solda (Figura 25).

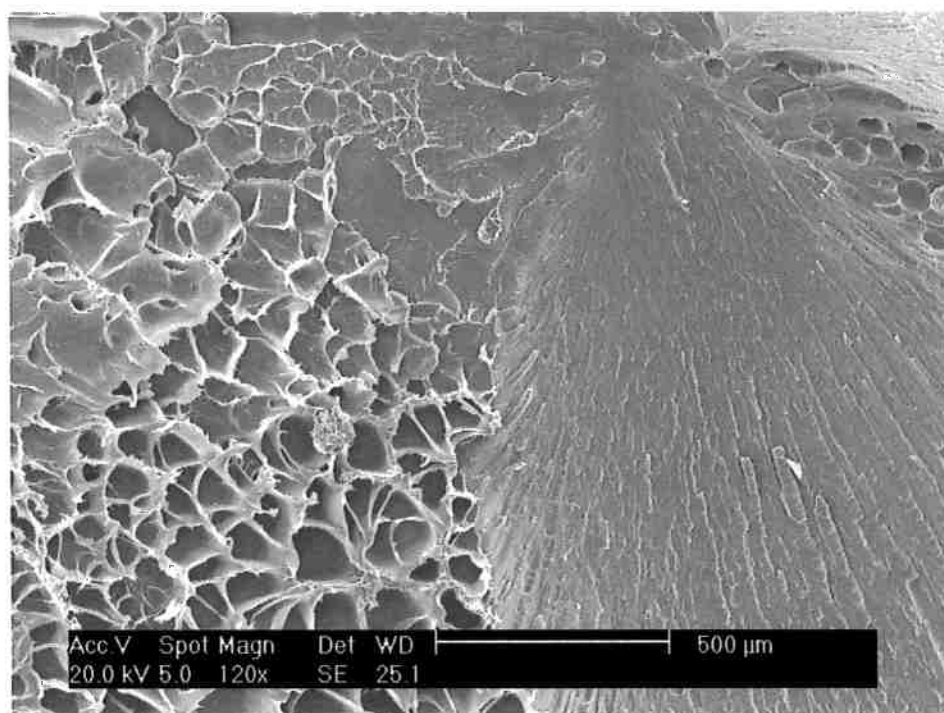


Figura 32 - Fratura da solda de uma amostra A

A Figura 33 apresenta a fratura da região soldada de uma amostra do tipo B. Observa-se à esquerda uma morfologia semelhante à obtida na amostra do tipo A.

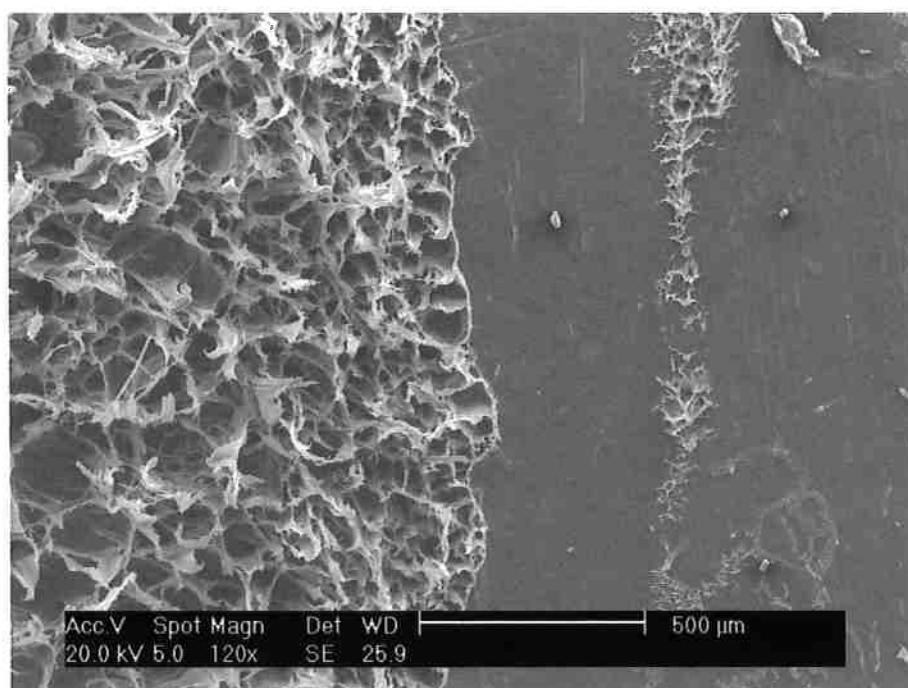


Figura 33 - Fratura da solda de uma amostra B

A Figura 34 apresenta a fratura da região soldada de uma amostra do tipo C. Observa-se à direita uma morfologia de espuma semelhante à obtida na amostra do tipo A.

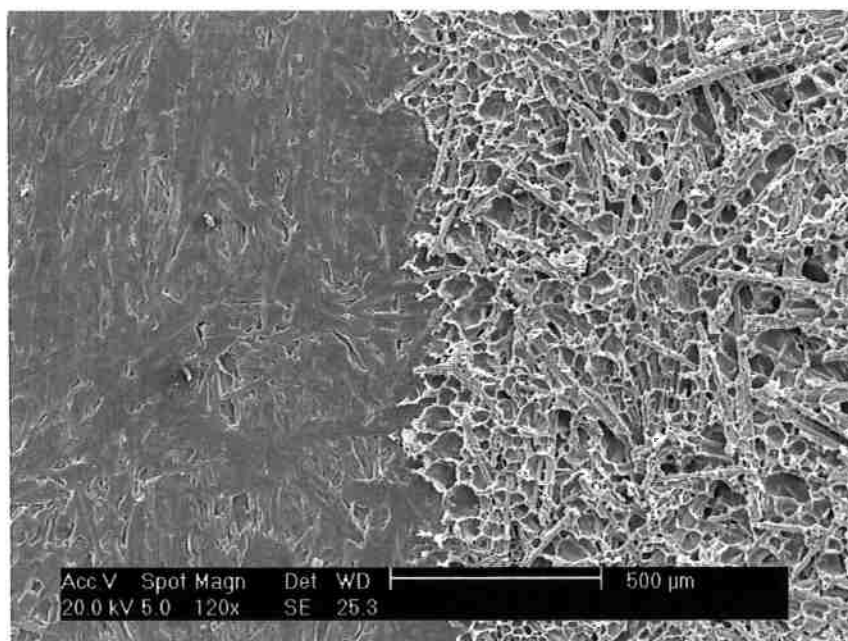


Figura 34 - Fratura da solda de uma amostra C

A Figura 35 apresenta em detalhe a região porosa da fratura da solda de uma amostra do tipo C.

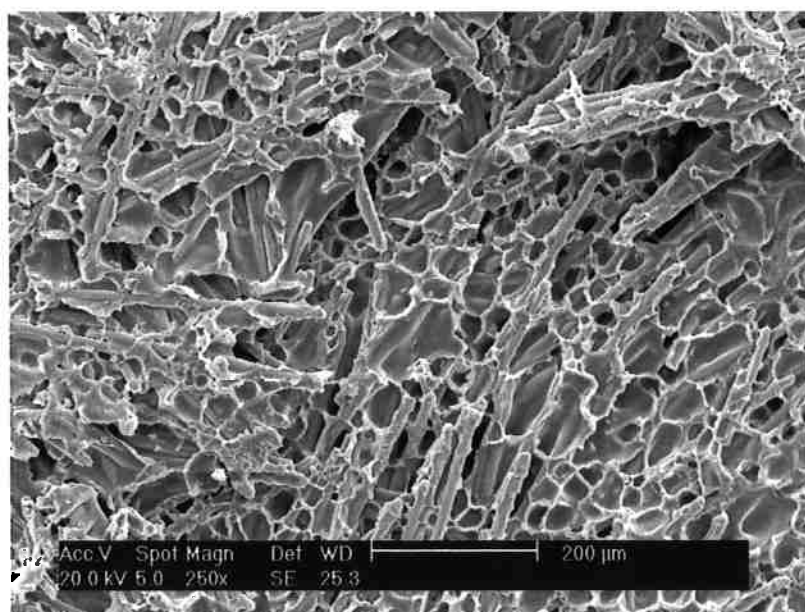


Figura 35 - Detalhe da fratura da solda de uma amostra C

5. CONCLUSÕES

Com base nos processos, materiais e metodologias empregadas pode-se concluir que:

- 5.1 Com o aumento da quantidade de fibra de vidro ocorreu uma diminuição da janela operacional.
- 5.2 O aumento da fração de fibra produziu juntas com maior resistência mecânica.
- 5.3 A região soldada foi degradada pela temperatura atingida durante a soldagem.

6. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

- 6.1 Estudo da utilização de estabilizantes térmicos que evitem a degradação do nylon durante a soldagem.
- 6.2 Estudo da variação da soldabilidade com diferentes geometrias de sonotrodo.
- 6.3 Estudo do efeito de tratamentos de superfície na soldagem do nylon por ultra-som.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] MATTHEWS, F.L., RAWLINGS, R.D. Composite Materials: Engineering and Science. Woodhead Publishing Limited, 1999.

[2] CLYNE, T.W., WITHERS, P.J. An Introduction to Metal Matrix Composites. Cambridge University Press, 1993.

[3] WATSON, M.N. Joining Plastics in Production. The Welding Institute, 1998.

[4] Hélio Wiebeck, Júlio Harada, Plásticos de Engenharia: Tecnologia e Aplicações. Artliber Editora, 2005. Pag 81 a 94.

[5] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/Hbase/Tables/sphtt.html>

[6] http://www.plasticsportal.net/wa/plasticsEU~en_GB/portal/show/content/plasticsportal_news/plasticsportal_news

[7] <http://www.vick.com.br/vick/produtos/nylon/nylon60mo.htm>

[8] Joelmir Mariano de Sousa, Estudo e Avaliação Mecânica das Juntas Soldadas por Ultra-Som de Policarbonato e Poli(metacrilato-de-metila), dissertação de mestrado à Universidade de São Paulo, 2005.

[9] http://en.wikipedia.org/wiki/Differential_scanning_calorimetry

[10] <http://www.bransonultrasonicwelders.com/showPage.php?page=buw240>

[11] <http://www.rtpcompany.com/info/data/0200A/index.htm>

[12] S. V. Levchik and G. F. Levchik, Mechanism of Action of Phosphorus-based Flame Retardants in Nylon 6. 111. Ammonium Polyphosphate/Manganese Dioxide, Fire and Materials, VOL. 20, 183-190 (1996)

[13] Turri, W. F.; Brandi, S. D.; Demarquette, N. R., OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM POR ULTRA-SOM EM policarbonato E polimetacrilato de metila – uma abordagem térmica.

[14] The German Electrical and Electronic Manufacturers' Association, Ultrasonic assembly of thermoplastic mouldings and semi-finished products.

[15] E. B., MICHAEL, Introduction to Thermal Analysis – Techniques and applications, Chapman and Hall, 1988.