

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

CAIO MIOTTO CHINELATO

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UMA UNIÃO
TERMOPLÁSTICA ENTRE OS MATERIAIS PMMA E ABS SUBMETIDOS AO
PROCESSO DE SOLDA POR VIBRAÇÃO LINEAR UTILIZANDO A
METODOLOGIA DE PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS**

CAXIAS DO SUL

2015

CAIO MIOTTO CHINELATO

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UMA UNIÃO
TERMOPLÁSTICA ENTRE OS MATERIAIS PMMA E ABS SUBMETIDOS AO
PROCESSO DE SOLDA POR VIBRAÇÃO LINEAR UTILIZANDO A
METODOLOGIA DE PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS**

Relatório de Estágio II, apresentado como requisito parcial para aprovação na disciplina de Estágio II (MEC0258D), do curso de Engenharia Mecânica na Universidade de Caxias do Sul.

Orientador Professor Dr. Marcos Alexandre Luciano

CAXIAS DO SUL

2015

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UMA UNIÃO
TERMOPLÁSTICA ENTRE OS MATERIAIS PMMA E ABS SUBMETIDOS AO
PROCESSO DE SOLDA POR VIBRAÇÃO LINEAR UTILIZANDO A
METODOLOGIA DE PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS**

CAIO MIOTTO CHINELATO

ESTE RELATÓRIO FOI JULGADO ADEQUADO PARA A APROVAÇÃO NA
DISCIPLINA DE ESTÁGIO II DO CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

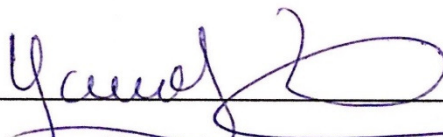
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Alexandre Fassini Michels, Dr. Eng.



Prof. Deives Roberto Baretta, Me.



Prof. Marcos Alexandre Luciano, Dr. Eng.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por renovar minhas forças e me acompanhar nos momentos difíceis e, é claro, nos momentos de pura felicidade ao longo dessa jornada.

Agradeço também a minha família, meus pais Agenor e Lurdes, e ao meu irmão Cássio. Eles são o motivo pelo qual me dediquei a cada etapa durante esse período. Eles formam a base de tudo, a minha família, onde nunca mediram esforços para me apoiar, me incentivar e me fazer acreditar que seria capaz de alcançar meu objetivo final.

Deixo também meus sinceros agradecimentos a minha namorada Caroline Ballardin, que mesmo distante todo esse período, não deixou de acreditar na minha capacidade. São quase 10 anos juntos onde cada carinho, cada palavra, cada afeto, iluminaram meus pensamentos e fortaleceram minhas ideias. Rogo todas as noites por ela fazer parte da minha vida.

A empresa Braslux, todos os seus colaboradores e em especial aos colegas de setor, por terem contribuído diretamente ou indiretamente no desenvolvimento desse trabalho. Suas orientações agregaram muito na formação de ideias.

Aos professores e colegas da Universidade de Caxias do Sul, em especial ao Prof. Dr. Marcos Alexandre Luciano, por ter acreditado na minha proposta e me guiado ao longo de todo esse período.

RESUMO

Este trabalho de conclusão do curso de Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul apresenta uma avaliação da resistência mecânica da união de solda em lanternas automotivas. O estudo analisou a união entre os materiais poliméricos, Polimetil-metacrílico e Acrilonitrila Butadieno, pelo processo de solda por vibração linear. Foi utilizada a metodologia de Design of Experiments, com o modelo de planejamento 2^k para comparar três fatores relacionados ao processo produtivo: pré-aquecimento, penetração e alívio de tensões. Os níveis de cada fator buscaram analisar o fluxo de processo atual com o proposto. Os resultados apresentados indicam com 95% de assertividade que os fatores de penetração e alívio de tensões aumentam a resistência à tração da união soldada.

Palavras-chave: Lanternas automotivas traseiras. Polimetil-metacrílico. Acrilonitrila Butadieno Estireno. Solda por vibração linear. Design of Experiments.

ABSTRACT

This conclusion course article in Mechanical Engineering at Universidade de Caxias do Sul, features a mechanical strength evaluation in automotive rear light. The review aims to examine the weld joint between two polymeric materials, Polymethyl Methacrylic and Acrylonitrile Butadiene Styrene, by the linear vibration welding process. It used the methodology of Design of Experiments, with 2^k planning model to compare three factors related to the production process: preheating, penetration and stress relieving. Levels of each factor sought to analyze the current process flow with the suggested. The results indicated a 95% assertiveness that the penetration factors and stress relieving increase the tensile strength of the weld joint .

Key-words: Rear automotive lights. Polymethyl Methacrylic. Acrylonitrile Butadiene Styrene. Linear Vibration Welding. Design of Experiments.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Produtos fabricados pela Braslux Ind. Autopeças LTDA.	16
Figura 2 - Esboço da união soldada entre os materiais PMMA e ABS.	17
Figura 3 - Número de automóveis por região no Brasil.	21
Figura 4 - Esquema de solda por vibração linear.	28
Figura 5 - Etapas de transição do processo de penetração ao longo do tempo.	30
Figura 6 - Representação ilustrativa do processo de penetração.	31
Figura 7 - Ilustração para projeto do friso e pista de solda.	32
Figura 8 - Estrutura química do ABS.	33
Figura 9 - Estrutura química do PMMA.	33
Figura 10 - Lanterna Braslux de geometria simples.	38
Figura 11 - Comparativo entre união soldada com e sem rebarbas.	39
Figura 12 - Fluxo de processo atua versus fluxo de processo proposto.	40
Figura 13 - Vista explodida da Lanterna Traseira diâmetro 96 mm.	47
Figura 14 - Comparativo do produto com e sem os componentes internos.	48
Figura 15 - Dimensões da junta soldada.	48
Figura 16 - Projeto e produto das chapas para tracionamento.	50
Figura 17 - Forno para aquecimento das amostras.	51
Figura 18 - Temperatura das amostras "(1)" e "a".	52
Figura 19 - Equipamento de medição por infravermelho FLIR E60.	53
Figura 20 - Equipamento de solda por vibração linear JM Automação.	54
Figura 21 - Gráfico de força X deformação das amostras (1).	57
Figura 22 - Combinações dos tratamentos em análise geométrica.	59

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Vantagens e desvantagens do uso de plásticos nos automóveis.....	21
Quadro 2 - Principais polímeros utilizados na indústria automobilística.....	23
Quadro 3 - Principais parâmetros de processo de solda por vibração.....	29
Quadro 4 - Compatibilidade entre polímeros para o processo de solda vibracional.	34
Quadro 5 - Lista de atividades macro para desenvolvimento do trabalho.....	41
Quadro 6 - Etapas para desenvolvimento de um DOE.	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades gerais do polímero PMMA.....	24
Tabela 2 - Propriedades gerais do polímero ABS.	25
Tabela 3 - Aplicação dos processos de união conforme material e peça.	26
Tabela 4 - Espessura de parede sugerida para termoplásticos.	32
Tabela 5 - Condições de recozimento de peças moldadas.....	36
Tabela 6 - Principais fatores, limites e níveis das combinações.	43
Tabela 7 - Combinações dos tratamentos X Fatores do planejamento.....	44
Tabela 8 - Combinações dos tratamentos e os valores de planejamento fatorial.	45
Tabela 9 - Combinações dos tratamentos X Níveis das 1ª e 2ª réplica.	49
Tabela 10 - Acompanhamento das temperaturas de alívio de tensão.	52
Tabela 11 - Parâmetros fixos para produção das amostras.....	55
Tabela 12 - Resultados dos ensaios de tração.	56
Tabela 13 - Tempos de solda	58
Tabela 14 - Resultados dos efeitos médios do planejamento fatorial.	59
Tabela 15 - Resultados da análise de variância.....	61
Tabela 16 - Análise dos fatores de variação.	62

LISTA DE ABREVIATURAS

h	hora
m	metros
min	minutos
mm	milímetro
mm ²	milímetros cuadrados
pol	polegadas
°C	graus Celsius

LISTA DE SIGLAS

ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
DOE	<i>Design of Experiments</i>
IHM	Interface Homem Máquina
IR	<i>Infrared</i>
LASER	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>
LED	<i>Light Emitter Diode</i>
LTDA	Limitada
PA	Poliamida ou <i>Nylon</i>
PC	Policarbonato
PE	Polietileno
PELD	<i>Low Density Polyethylen</i> (polietileno de baixa densidade)
PEHD	<i>High Density Polyethylen</i> (polietileno de alta densidade)
PMMA	Polimetil-metacrílico
POM	Poliacetal
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
Tg	Temperatura de Transição Vítre

SUMÁRIO

RESUMO	5
ABSTRACT	6
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	7
LISTA DE QUADROS	8
LISTA DE TABELAS	9
LISTA DE ABREVIATURAS	10
LISTA DE SIGLAS	11
1 INTRODUÇÃO	14
1.1 AMBIENTE DE ESTÁGIO	15
1.2 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO.....	16
1.3 OBJETIVOS	18
1.3.1 <i>Objetivo geral</i>	18
1.3.2 <i>Objetivos específicos</i>	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1 INTRODUÇÃO	20
2.2 POLÍMEROS NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA	20
2.2.1 <i>Crescimento dos polímeros na indústria automotiva</i>	20
2.2.2 <i>Principais polímeros na indústria automotiva</i>	22
2.2.2.1 Polimetil-metacrilico – PMMA	24
2.2.2.2 Acrilonitrila Butadieno Estireno – ABS	25
2.3 PROCESSOS DE SOLDA E UNIÃO EM POLÍMEROS	26
2.3.1 <i>Processos de solda e união em geral</i>	26
2.3.2 <i>Processo de solda vibracional linear</i>	28
2.3.2.1 Descrição do processo.....	28
2.3.2.2 Parâmetros de processo	29
2.3.2.3 Etapas de processo e penetração de solda.....	29
2.3.2.4 Aplicações.....	31
2.3.3 <i>Projetos de componentes para união plástica</i>	31
2.3.4 <i>Compatibilidade entre os polímeros</i>	33
2.3.5 <i>Processo de pré-aquecimento e alívio de tensões</i>	35

3	ETAPAS DE IMPLEMENTAÇÃO DO TRABALHO	37
3.1	INTRODUÇÃO	37
3.2	ANÁLISE DA SITUAÇÃO ATUAL.....	37
3.3	ETAPAS DE INTERVENÇÃO	39
3.4	PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS	41
3.5	ANÁLISE DO PRODUTO	46
3.6	AMOSTRAS E EQUIPAMENTOS	49
4	RESULTADOS	56
4.1	INTRODUÇÃO	56
4.2	RESULTADOS E DISCUSSÕES	56
5	CONCLUSÕES.....	63
	REFERÊNCIAS	65
	ANEXO A – FASES DO PROCESSO DE SOLDA POR VIBRAÇÃO LINEAR.....	69
	ANEXO B – FICHA TÉCNICA PMMA ACRIGEL LEP100	72
	ANEXO C – FICHA TÉCNICA ABS BASF TERLURAN GP-35.....	73
	ANEXO D – GRÁFICOS DO ENSAIO DE TRAÇÃO.....	74
	ANEXO E – PONTOS PERCENTUAIS DA DISTRIBUIÇÃO F 95,0%.....	78

1 INTRODUÇÃO

A partir das últimas décadas, as exigências de qualidade e eficiência de produção da indústria automotiva aumentaram as demandas por desenvolvimentos focados em novos materiais e processos. Materiais mais leves, de menor custo, e que facilitam a manufatura surgiram na indústria mundial, revolucionando os conceitos utilizados até então.

Entre tantas opções disponíveis na indústria, os polímeros ganharam espaço substituindo diversos materiais, como o alumínio, até então utilizado em acabamentos internos e acessórios; o aço, onde se produzia boa parte do automóvel; o vidro, utilizado nas lentes de faróis e lanternas. Segundo Szeteiová (2010), cerca de 50% dos componentes internos de um veículo comercial são produzidos em polímeros, incluindo acabamentos internos de portas, sistemas de segurança e conjuntos de bancos.

Com a inclusão dos polímeros nesse mercado, necessita-se cada vez mais gerar maneiras diferentes de manufaturar os produtos. Atualmente os diferentes processos de produção possibilitam a confecção rápida e eficiente para atender o tão exigido mercado automotivo. Para Medina (1998) os novos processos de produção são essências para o crescimento e difusão dos polímeros na indústria. Essa necessidade abrange os produtores de materiais poliméricos, passando pelos fabricantes de autopeças, até chegarem nas montadoras de veículos.

Na indústria automotiva há inúmeras formas de desenvolvimentos com matéria-prima polimérica, o maior foco é em processos que atendam aos quesitos dimensionais, estruturais e que garantam a integridade do produto. Processos tais que iniciam na sua formação ou moldagem (processo primário – injeção, *vaccum forming*, rotomoldagem ou sopro), ganhando forma e estrutura, até a montagem e união com demais produtos (processo secundário, terciário e assim sucessivamente).

Analisando um automóvel, seja da linha leve (carros utilitários e motos) ou da linha pesada (ônibus, caminhões ou implementos rodoviários), encontra-se vários exemplos de componentes que passam por processos de moldagem. O processo primário não é suficiente para atender o conceito final do projeto, pois há restrições que impossibilitam a produção com apenas uma única etapa. É a partir daí que os processos secundários ganham espaço, visando atender demandas de tratamento

superficial, montagem e união dos componentes.

A lanterna traseira de um veículo, por exemplo, tem como característica a união de componentes fabricados com matérias-primas diferentes. A união desses materiais tem como objetivo atender as normas regulamentadoras, reduzir o custo em material, garantir a dissipação do calor gerado internamente e cumprir com os requisitos estéticos do produto. Esse processo é realizado a partir da junção por meio de um adesivo selante ou, dependendo da característica dos materiais, por processos específicos como: solda por ultrassom, *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* (LASER), termofusão e vibração linear ou rotacional (normalmente conhecido como processo de solda por fricção).

Para Frantz (2014), escolher o melhor método de união de componentes poliméricos deve ser avaliado separadamente. Mesmo se um processo obteve sucesso no passado, não impossibilita a sua substituição. Com base nesses dados é pertinente definir as propriedades e requisitos referentes aos materiais dos componentes, a geometria das partes e aplicações de uso final.

O processo de solda por vibração linear se destaca diante dos demais. Sua flexibilidade de desenvolvimento possibilita unir diversos materiais sem comprometer as características visuais do produto. Para uma lanterna traseira esse processo é vantajoso, pois permite unir componentes com características geométricas complexas. Garantindo que o produto seja estanque a água, poeira e gases.

Se comparado aos anos 90, a lanterna traseira ganhou maior ênfase no *design* final do veículo, porém as formas geométricas atuais exigem maiores estudos no desenvolvimento. É diante desse contexto que o estudo a seguir visa compreender as características que cercam a união soldada de uma lanterna, com o intuito de garantir suas características principais, sem perder desempenho em sua aplicação final.

1.1 AMBIENTE DE ESTÁGIO

A Braslux Indústria de Autopeças LTDA, com sede na cidade de Caxias do Sul/RS, desenvolveu ao longo dos seus 39 anos de história uma cultura de inovação, pioneirismo e qualidade dos seus produtos e serviços. Em 1976 a empresa foi fundada com foco em produção de bagageiros para vários tipos de veículos, contudo a partir do ano de 1979 diversificou o ramo de atuação dando

ênfase na produção de lanternas de sinalização para ônibus e implementos rodoviários. Atualmente, seu parque fabril é dividido em duas unidades: matriz, focada no desenvolvimento de sistemas de iluminação; e filial, especializada em injeção de peças plásticas.

Pioneira no desenvolvimento de lanternas em *Light Emitter Diode* (LED) no mercado automotivo brasileiro, a empresa busca fornecer soluções completas de iluminação e sistemas elétricos que proporcionem flexibilidade e rapidez na aplicação dos seus clientes. A Figura 1 ilustra alguns dos produtos fabricados pela empresa: conjunto lanterna traseira multi-funções, lanterna direcional, porta focos e sistemas de cabeamento elétrico.

Figura 1 - Produtos fabricados pela Braslux Ind. Autopeças LTDA.



Fonte: Adaptado de Braslux (2011).

O trabalho de conclusão do curso foi desenvolvido junto ao departamento de Engenharia de Processos, responsável por implementar novos produtos e processos no ambiente fabril. A equipe é composta por três pessoas, sendo um engenheiro de processos, um analista de processos e um técnico em processos, supervisionados pelo gestor industrial da área.

1.2 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

A utilização de polímeros na fabricação de lanternas na Braslux tem como destaque os termoplásticos polimetil-metacrílico (PMMA) e acrilonitrila butadieno estireno (ABS). O PMMA é considerado um termoplástico rígido com propriedades muito similar ao vidro devido à característica de transparência. Assim como o PMMA, o ABS é também considerado um termoplástico rígido e leve, porém gerado da combinação de acrilonitrila, butadieno e estireno, formando um copolímero

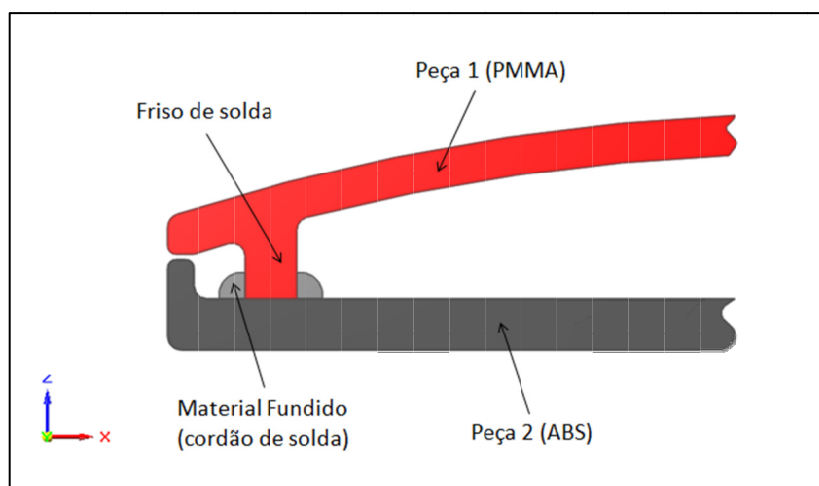
composto econômico e com maior absorção de impacto.

Além dos materiais citados, podem ser aplicados o poliestireno (PS), o policarbonato (PC) e a poliamida (PA). Contudo a utilização de PMMA e ABS corresponde 95% dos polímeros aplicados em lanternas atualmente na empresa. É com base nesses dados que se abre espaço para estudos voltados ao aperfeiçoamento do produto e processo.

A utilização do processo de solda por vibração linear usado atualmente, substituiu a aplicação de adesivo selante para união das partes do produto, contudo a caracterização desse processo consiste em fundir os dois materiais por meio de fricção. A geração de calor entre os materiais através da fricção molecular superficial, juntamente com os demais parâmetros de processo, formam a união soldada.

A Figura 2 exemplifica a vista de corte frontal da união soldada entre materiais divergentes. A peça 1 em PMMA e a peça 2 em ABS são unidas pelo processo de solda vibracional linear, onde o friso de solda em PMMA funde com a peça em ABS em decorrência da fricção e do aumento da temperatura nas superfícies, posteriormente caracterizado pelo material fundido. Para que isso aconteça a peça 1 vibra durante alguns segundos ao longo do eixo Y, enquanto a peça 2 permanece estática.

Figura 2 - Esboço da união soldada entre os materiais PMMA e ABS.



Fonte: Autor (2015).

A grande utilização dos polímeros PMMA e ABS no processo de solda por vibração linear para construção de lanternas automotivas atualmente na empresa

motiva o entendimento das características mecânicas da união soldada. As variáveis que cercam a aplicação de uma lanterna como: variação de pressão interna versus externa na aplicação final do produto; as tensões superficiais geradas pela manufatura; a baixa resistência ao impacto da união; e as possíveis falhas do processo são pontos que merecem uma análise profunda durante o desenvolvimento desse trabalho.

É com base nessas análises que a Braslux Indústria de Autopeças LDTA, líder no fornecimento de iluminação para o ramo brasileiro automotivo pesado, espera que os métodos utilizados nesse estudo possam gerar uma melhor compreensão nas suas aplicações atuais e concretize diretrizes para os desenvolvimentos futuros.

1.3 OBJETIVOS

Com o intuito de atender os objetivos do trabalho de conclusão de curso em engenharia mecânica, juntamente com as estratégias e diretrizes da empresa, os objetivos deste trabalho são apresentados a seguir.

1.3.1 Objetivo geral

Analisar o comportamento mecânico de uma união termoplástica entre PMMA e ABS, submetidos ao processo de solda por vibração linear, utilizando a metodologia de planejamento de experimentos.

1.3.2 Objetivos específicos

Para o atender o objetivo geral desse trabalho, devem-se concluir os objetivos específicos citados abaixo:

- Pesquisar as propriedades físico-químicas (mecânicas, químicas, térmicas) dos polímeros PMMA e ABS, assim como suas aplicações no ramo industrial automotivo;
- Pesquisar as características geométricas de projeto para uniões termoplásticas;

- Pesquisar as características do processo de solda por vibração linear aplicada aos polímeros.
- Definir com auxílio da metodologia de planejamento de experimentos as etapas de execução das atividades.
- Determinar o fluxo de processo seja com ou sem pré e pós-aquecimento, e os parâmetros de máquina ideais para realizar a solda por vibração linear.
- Utilizar da metodologia de planejamento de experimento para comparar as análises realizadas nas amostras;
- Validar as alternativas que determinem a maior resistência e qualidade de solda da união.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 INTRODUÇÃO

Este presente capítulo visa abordar a revisão bibliográfica necessária para o desenvolvimento e entendimento dos principais conceitos utilizados para a realização do trabalho. Esta revisão analisa os polímeros utilizados na indústria automotiva e suas aplicações, as características principais dos polímeros PMMA e ABS, as características de projeto no desenvolvimento de produtos poliméricos e os processos de solda utilizados pela indústria de termoplásticos dando maior ênfase no processo de solda por vibração linear.

2.2 POLÍMEROS NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA

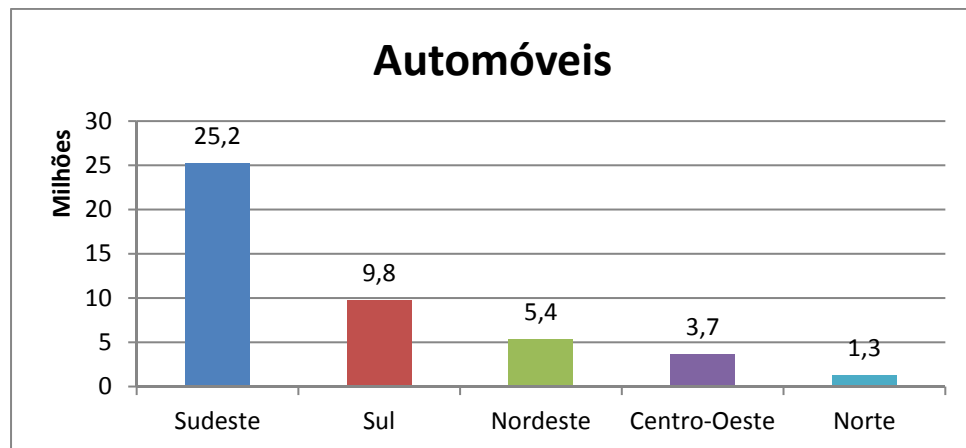
2.2.1 Crescimento dos polímeros na indústria automotiva

O aumento na demanda por veículos nas últimas décadas proporciona uma demasiada busca por componentes leves que possibilitam melhor desempenho em campo. A utilização dos polímeros ganha destaque visando aperfeiçoar os projetos em geral com ênfase em reduzir custos de desenvolvimento garantindo as aplicações de um sistema automotivo.

Com base nos dados obtidos em Reis (2014) o número de carros no Brasil não para de crescer. São 45,4 milhões de veículos nas ruas, chegando ao número de um automóvel para cada 4,4 habitantes. Se comparado à última década, essa proporção era de um a cada 7,4 habitantes, proporcionando um aumento de 68,2%.

A Figura 3 apresenta o número de automóveis (carros) em cada região do Brasil. A região sudeste se destaca em relação ao demais com aproximadamente 25,2 milhões de automóveis, seguida pela região sul com 9,8 milhões. As duas regiões juntas representam aproximadamente 35,0 milhões de veículos no país, ocupando 77,01% do mercado automotivo leve no Brasil.

Figura 3 - Número de automóveis por região no Brasil.



Fonte: Adaptado de Reis (2014).

Com esse crescimento da indústria automobilística, os polímeros tem se mostrado uma opção vantajosa para o setor de autopeças. Seu baixo índice de densidade é umas das principais vantagens para a substituição dos materiais tradicionais utilizados a anos. Essa característica é fundamental para a economia em projeto e produção, além de se destacar na eficiência do veículo, reduzindo o consumo de combustíveis.

Hermans (2003) apresenta as vantagens e desvantagens da utilização dos polímeros aplicados em componentes de um automóvel conforme Quadro 1. Tendo em destaque o uso de polímeros a economia de combustíveis e de investimentos de produção.

Quadro 1 - Vantagens e desvantagens do uso de plásticos nos automóveis.

Vantagens	Desvantagens
Redução de peso Redução de emissão de CO ₂ Redução de custos Redução do tempo de produção Menores investimentos em manufatura Aumento da resistência à corrosão Possibilidade de designs mais modernos Formatos mais complexos Excelente processabilidade Veículos mais silenciosos Melhor uso de espaço Aumento de segurança	Deterioração por ação térmica e ambiental Inflamabilidade Baixa resistência ao impacto Deformação permanente elevada Dificuldade de adesão de película de tinta Facilidade de manchas permanentes Baixa estabilidade dimensional

Fonte: Hermans (2003, p.110).

Segundo a APME (1999) se utilizado 100 quilos de polímeros em um determinado veículo pesando uma tonelada, a redução de consumo de combustíveis pode chegar até 7,5%. A utilização desse material mais leve reduz o peso total do veículo em até 200 a 300 quilos. Esse número tem maior destaque se comparado à vida útil do veículo, tendo como base 150 mil quilômetros rodados, a economia pode chegar até 750 litros de combustível devido à utilização de matérias mais leves.

Já para Sehanobish (2009), o uso de materiais poliméricos nas últimas três décadas cresceu muito atingindo todos os setores e indica que atualmente são responsáveis por até 50% da construção de alguns veículos.

2.2.2 Principais polímeros na indústria automotiva

Segundo Bomtempo (2001) a indústria automotiva, seja ela direta ou do ramo de autopeças, é o maior consumidor de polímeros de engenharia. Materiais tais que apresentam em suas características, boa propriedade mecânica e térmica, ideias para esse setor.

A classificação dos polímeros pode ser caracterizada segundo sua estrutura molecular, segundo seu comportamento térmico ou mecânico. Canevarolo (2010) classifica, segundo seu comportamento mecânico, os polímeros em termoplásticos e termorrígidos:

- **Termoplásticos:** polímeros que ao sofrerem aumento substancial de temperatura e pressão, podem ser moldados devido às características de amolecimento e fluidez. Exemplos: PMMA, polipropileno (PP), ABS, polietileno (PE), etc.
- **Termorrígidos:** polímeros que ao sofrerem um aumento substancial da temperatura e marginal de pressão, podem ser moldados devido às características de amolecimento e fluidez. Porém diferente dos termoplásticos, reagem quimicamente, formando ligações cruzadas entre as cadeias. Exemplos: epóxi (araldite), resina de fenol-dormaldeído (baquelite), etc.

Ashby e Jones (2007) classificam os polímeros, além de termoplásticos e termorrígidos, em:

- **Elastômeros ou borrachas:** são polímeros que em temperatura ambiente tem suas ligações cruzadas fundidas. Essas ligações geram uma forma de “memória” ao material, trazendo para suas características normais após ser descarregado. Exemplos: poliisopreno (borracha natural), polibutadieno (borracha sintética para pneus de automóveis), policloropreno (neoprene – borracha utilizada em vedações, resistente a óleo), etc.
- **Naturais:** a borracha poliisopreno, a celulose, os componentes da madeira e as proteínas da lã são considerados polímeros naturais, pois podem ser encontrados na natureza. Alguns desses polímeros servem como matéria prima para fabricação de diversos produtos como o papel, originado da celulose.

O surgimento de materiais mais resistentes e que possibilitem melhores aplicações no setor, os polímeros como a PA, o PC, o poliacetal (POM) e a resina ABS são os destaques entre os consumos mundiais. A Quadro 2 apresenta os principais polímeros e suas possíveis aplicações na indústria automotiva. Caracterizando suas propriedades físicas, químicas e mecânicas.

Quadro 2 - Principais polímeros utilizados na indústria automobilística.

Polímeros	Propriedades	Peças Produzidas
Policarbonato (PC)	Semelhança a vidro Alta resistência ao impacto Boa estabilidade dimensional Boa resistência às intempéries	Faróis; Lanternas; Painel de instrumento;
Poliamida (PA)	Boa processabilidade Resistência à tração Resistência a alta temperatura Excelente estabilidade dimensional	Dutos de captação de ar; Conectores de sistema de injeção;
Poli(metacrilato de metila) (PMMA)	Semelhança ao vidro Boa resistência química Alta resistência às intempéries Transparência	Fibras óticas; Lanternas; Protetores de chuva nas janelas;
Copoli (estirenobutadieno-acrilonitrila) (ABS)	Resistência à corrosão Alta resistência química Ótima processabilidade Resistência ao impacto Resistência a baixas temperaturas Grande estabilidade dimensional	Grades; Calotas; Painel de instrumentos; Carcaça de lanterna;

Fonte: Adaptado de Hermais (2003, p.110-112).

Os polímeros de engenharia PMMA e ABS utilizados na confecção das lanternas automotivas ganham destaque nesse trabalho e são apresentados nos tópicos a seguir.

2.2.2.1 Polimetil-metacrilico – PMMA

O PMMA, nome científico Polimetil-metacrilico, ou também conhecido comercialmente como acrílico, é um polímero amorfo e transparente. Essa característica se dá pela distribuição aleatória ao longo da cadeia molecular dos grupos de metila e éster, impedindo a sua cristalização.

A Tabela 1 apresenta algumas propriedades gerais do PMMA fabricado pelo processo de injeção. As características similares ao vidro proporcionam ao PMMA aplicações na indústria em geral, pois apresentam menor densidade, maior resistência ao impacto e processamento em temperaturas mais baixa.

Tabela 1 - Propriedades gerais do polímero PMMA.

	Propriedades		ASTM	Processo de injeção
Processo	Temperatura de fusão (Tg)	K (°C)	D1238	358,15-378,15 (85-105)
Mecânico	Resistência à tração de ruptura	MPa (p.s.i.)	D638	48,26-72,39 (7000-10500)
	Alongamento à ruptura	%	D638	2-5,5
	Resistência à tração de escoamento	MPa (p.s.i.)	D638	53,78-73,08 (7800-10600)
	Resistência à compressão (ruptura e escoamento)	MPa (p.s.i.)	D695	72,39-124,11 (10500-18000)
	Resistência à flexão (ruptura e escoamento)	MPa (p.s.i.)	D790	72,39-131,00 (10500-19000)
	Módulo de compressão	MPa (p.s.i.)	D695	2,55-3,17 (370-460)
	Módulo de flexão 295,93 K (73 °F)	MPa (p.s.i.)	D790	2,24-3,17 (325-460)
	Dureza	Rockwell	D785	M68-105
	Térmico	Coefficiente linear de expansão térmica	10 ⁻⁶ pol./pol.°C	D696
Físico	Peso específico		D792	1,17-1,20

Fonte: Adaptado de Harper (1999, apêndice C).

Para Troughton (2008) o PMMA é um polímero que pode ser utilizado nos processos de solda em geral. Contudo sua resistência à tração, após etapa de

solda, pode ser reduzida em até 50% do valor definido. Para processo de solda por vibração linear o PMMA tem como referência os seguintes parâmetros: amplitude de 0,76 a 1,78 mm e pressão de 1,4 a 3,4 MPa.

2.2.2.2 Acrilonitrila Butadieno Estireno – ABS

O ABS, sigla derivada à nomenclatura Acrilonitrila Butadieno Estireno, é um copolímero rígido e leve. As proporções de composição dependem da necessidade do cliente e da forma de processamento. Muito utilizado em vários segmentos da indústria, o ABS se destaca na linha automotiva pela flexibilidade e resistência na absorção de impacto. As maneiras de processamento são adequadas para injeção, extrusão, sopro e conformação a quente. A Tabela 2 apresenta algumas propriedades gerais do ABS fabricado pelo processo de injeção.

Tabela 2 - Propriedades gerais do polímero ABS.

	Propriedades		ASTM	Processo de injeção
Processo	Temperatura de fusão (Tg)	K (°C)	D1238	383,15-398,15 (110-125)
Mecânico	Resistência à tração de ruptura	MPa (p.s.i.)	D638	33,09-51,71 (4800-7500)
	Alongamento à ruptura	%	D638	3-45
	Resistência à tração de escoamento	MPa (p.s.i.)	D638	29,65-48,26 (4300-7000)
	Resistência à compressão (ruptura e escoamento)	MPa (p.s.i.)	D695	49,64-68,95 (7200-10000)
	Resistência à flexão (ruptura e escoamento)	MPa (p.s.i.)	D790	62,05-89,63 (9000-13000)
	Módulo de compressão	MPa (p.s.i.)	D695	1,31-3,03 (190-440)
	Módulo de flexão 295,93 K (73 °F)	MPa (p.s.i.)	D790	2,07-2,76 (300-400)
	Dureza	Rockwell	D785	R100-115
Térmico	Coefficiente linear de expansão térmica	10 ⁻⁶ pol./pol.°C	D696	60-93
Físico	Peso específico		D792	1.05-1.08

Fonte: Adaptado de Harper (1999, apêndice C).

2.3 PROCESSOS DE SOLDA E UNIÃO EM POLÍMEROS

2.3.1 Processos de solda e união em geral

As alternativas para realizar a união entre materiais poliméricos podem ser classificadas em três grupos: fricção e calor, mecânico e adesivo. Para cada tipo de alternativa é primordial entender as vantagens e desvantagens de cada situação. Frantz (2014) descreve os grupos como:

- **Mecânico:** a união se caracteriza pela utilização de sistemas mecânicos como encaixe, rebites, parafusos e sob pressão. Essa aplicação é comum em produtos que o capital de investimento seja baixo.
- **Adesivos:** a caracterização desse método se dá geralmente quando os materiais a serem unidos são incompatíveis, quando a união for permanente ou quando a geometria do produto impossibilite.
- **Fricção e calor:** para a realização desse processo, é extremamente necessário que os materiais sejam compatíveis entre si. Esse tipo de união caracteriza-se por ser permanente, garantir a estanqueidade e não haver necessidade de outro consumível para unir os componentes. O único ponto negativo é o investimento em equipamento e energia elétrica para realizar o processo.

Nos processos de fricção e calor, a região a ser fundida sofre aumento de calor e depois de unida, é resfriada formando a junta soldada. A Tabela 3 classifica as características do produto para os principais processos atuais:

Tabela 3 - Aplicação dos processos de união conforme material e peça.

(continua)

Características da peça a ser soldada	Solda por Ultrassom	Solda por Vibração Linear	Solda por Vibração Rotacional	Solda a laser	Solda por IR	Solda Hot Plate
<i>MATERIAIS</i>						
Resinas amorfas	+	+	+	+	+	+
Resinas semi-cristalinas	*	+	+	+	+	+
Olefinas	*	+	+	+	+	+
Borrachas termoplásticas	#	*	*	+	+	*
Compósitos	*	*	*	+	+	*

							(conclusão)
TIPO DE PEÇA							
Paredes finas	+	#	+	+	+	+	+
Geometria complexa	*	+	*	*	*	*	+
Peças grandes	*	+	#	*	*	*	+
Peças pequenas	+	+	+	+	+	+	+
Soldas internas	+	*	*	+	+	+	+
Paredes longas sem apoio	+	#	*	+	+	+	+
Laminados termoplásticos	+	*	@	@	@	@	*
Filmes termoplásticos	+	*	@	@	@	@	*

Legenda: + Recomendado; * Limitado; # Não recomendado; @ Não se aplica

Fonte: Adaptado de Frantz (2014, p.40).

Troughton (2008) classifica os principais processos de união entre componentes plásticos em:

- Processo de solda por ferramenta aquecida: também conhecido como termofusão ou *hot plate*, o processo consiste em aquecer as superfícies dos componentes com auxílio de uma placa quente, para posteriormente ser unida sob baixa pressão.
- Processo de solda por gás quente: os componentes são submetidos ao aquecimento por gás e unidos por um material de preenchimento.
- Processo de solda por ultrassom: a união entre os componentes ocorre pelo atrito e aquecimento entre as superfícies. Isso acontece pelo princípio de funcionamento gerado pela alta frequência e baixa amplitude que os componentes são submetidos HARPER (2006).
- Processo de solda por vibração rotacional: assim como o processo de solda por ultrassom, a união também ocorre por atrito e calor. Um dos componentes sofre vibração axial até fundir os materiais.
- Processo de solda a *laser*: o processo tem como base a emissão de luz estimulada por meio de radiação. A energia a *laser* é convertida em calor até unir os componentes EVONIK (2011).
- Processo de solda por indução: o processo utiliza aquecimento por indução para derreter e fundir um material auxiliar de ligação entre os componentes termoplásticos.

Ainda podem ser citados os processos de solda por IR, por micro-ondas, por resistência, por eletrofusão e etc.

O presente trabalho visa analisar o processo de solda por vibração linear, os tópicos a seguir apresentam uma visão geral do processo segundo alguns autores.

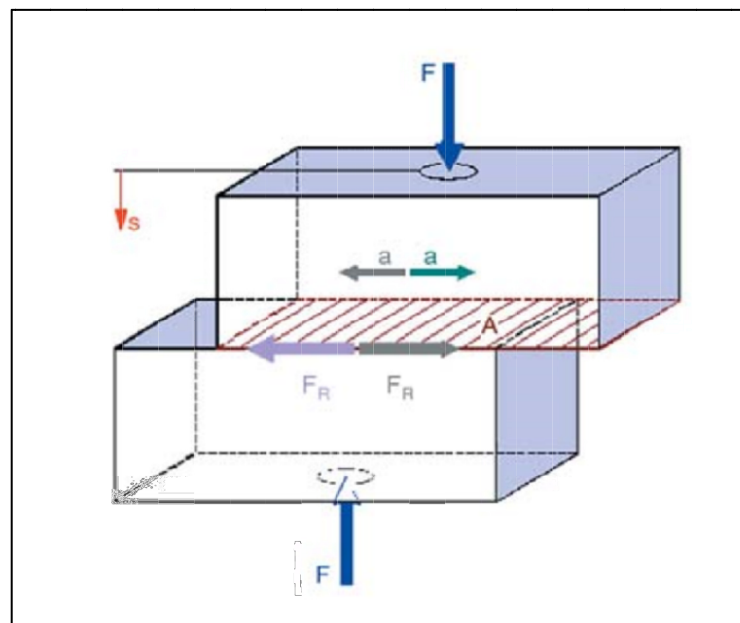
2.3.2 Processo de solda vibracional linear

2.3.2.1 Descrição do processo

Para Vargas (2008) o processo de solda por vibração linear consiste na oscilação entre dois componentes, onde uma das partes é fixada e a outra oscila linearmente em apenas uma direção. As superfícies em contato fundem devido ao calor gerado pelo atrito vibracional, tendo como consequência uma camada de material fundido.

A Figura 4 representa o esquema de solda por vibração linear, onde inicialmente os componentes são pressionados por uma carga definida (F). A área superficial (A) é definida pelo contato entre os dois componentes. Após, a parte superior entra em vibração, oscilando linearmente à uma amplitude (a). As forças resultantes (F_R) dessa oscilação geram atrito e conseqüentemente calor, até fundir os dois materiais. A quantidade de material a ser fundido é definida pela profundidade (s). O processo se mantém por mais alguns segundos garantindo o resfriamento da união soldada.

Figura 4 - Esquema de solda por vibração linear.



Fonte: Vargas (2008, p.1).

2.3.2.2 Parâmetros de processo

As principais variáveis que cercam o processo de solda por vibração linear estão descritas no Quadro 3. Para Grewell (2007) o controle das variáveis garante a qualidade da união soldada, pois estão diretamente ligadas ao princípio de aquecimento por atrito entre os materiais. Materiais com baixo índice de fluidez requerem maior amplitude de oscilação e tempo de solda até atingirem a temperatura de soldagem.

Quadro 3 - Principais parâmetros de processo de solda por vibração.

Variáveis do processo	Descrição
Modo de trabalho	Variável primária de funcionamento do processo (soldagem por tempo ou por profundidade).
Penetração ou profundidade	Quantidade de material a ser fundido (usualmente controlada em milímetros quando o modo de processo for por profundidade).
Tempo de solda	Período de duração apenas da etapa de vibração entre os componentes (controlada em segundos).
Força de solda	Parâmetro que determina a força aplicada entre os componentes durante o processo de solda (podendo ser controlada em Newton, Bar [pressão] ou em percentual).
Amplitude de oscilação	Comprimento do movimento de vibração da parte superior do sistema (usualmente controla em milímetros).
Tempo de resfriamento	Período de tempo de resfriamento da união após etapa de vibração (controlada em segundos).

Fonte: Adaptado de Grewell (2007, p.48).

Além dos parâmetros programáveis de processos, há fatores construtivos dos equipamentos que influenciam no comportamento do processo e na qualidade já junta soldada. Segundo Frantz (2014), há equipamentos que trabalham entre 100 até 240 Hz de frequência e que possibilitam uma amplitude entre 0,7 e 4,0 mm.

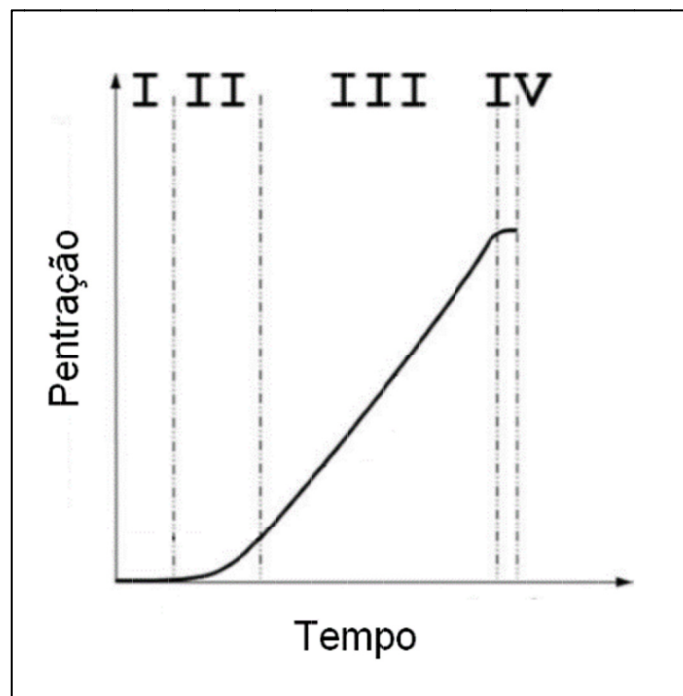
A capacidade do equipamento em trabalhar em altas frequências e amplitudes favorece na geração de calor durante o contato entre os materiais possibilitando a união de materiais cristalinos, semi-cristalinos e amorfos.

2.3.2.3 Etapas de processo e penetração de solda

As etapas que descrevem o processo de solda por vibração linear podem ser observadas no ANEXO A.

As etapas de penetração de solda entre dois materiais podem ser divididas em quatro fases, segundo Patham (2011). A Figura 5 e Figura 6 representam, respectivamente: a típica penetração desse processo, apresentando os quatro regimes de solda que exemplificam as principais características de transição durante a união entre os materiais; e o comportamento visual da união soldada durante as fases I, II, III em vista transversal.

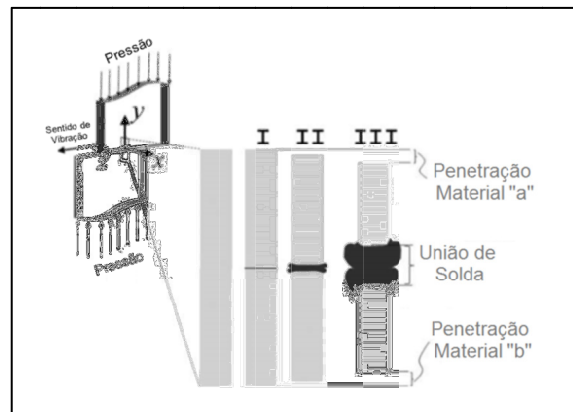
Figura 5 - Etapas de transição do processo de penetração ao longo do tempo.



Fonte: Adaptado de Patham (2011, p. 4).

- **I - Fase sólida de atrito:** também denominado como fase Coulomb de atrito, onde não ocorre penetração dos materiais, apenas garante o contato entre os mesmos devido à força aplicada.
- **II - Fase de penetração instável:** a fase onde os materiais começam a se fundir devido ao aumento de temperatura. A instabilidade se dá pelo fato da taxa de derretimento interno não ser compatível com a taxa de derretimento externo.
- **III - Fase de penetração constante:** onde as taxas de derretimento permanecem constantes garantindo uniformidade de fusão entre os materiais, aumentando a taxa de penetração.
- **IV - Solidificação:** fase onde há ausência de trabalho (vibração por atrito), os materiais solidificam resultando em um filme de material fundido.

Figura 6 - Representação ilustrativa do processo de penetração.



Fonte: Adaptado de Patham (2011, p. 4).

2.3.2.4 Aplicações

Segundo Troughton (2008) o processo de solda por vibração linear teve sua primeira aplicação na montagem de sistemas de amortecimento automotivo, no final da década de 70. O processo de solda por vibração abrange vários setores do ramo industrial, porém devido às características que possibilitam a união de peças grandes e o fato que as mesmas não necessitam ser planas, o setor automotivo é uma das principais áreas de aplicação.

As aplicações no setor automotivo incluem união de componentes em painéis internos, dutos de ar condicionado, reservatórios de fluídos, lanternas traseiras, carcaças de filtros, para-choques e *spoilers*.

Frantz (2014) enfatiza que 99,9% das aplicações desse processo têm a necessidade de obtenção de selagem hermética ou aplicações de forças internas. Isso quer dizer que não devem ter vazamentos de tinta, gás hélio, poeira, ar e umidades, água, entre outros.

2.3.3 Projetos de componentes para união plástica

Em boa parte dos casos, os componentes a serem soldados têm como origem de formação o processo de injeção. Segundo Berins (1991) aspectos como espessura de parede e cantos afiados devem ser estudados no projeto do produto para que não influenciem na manufatura dos componentes. A Tabela 4 apresenta espessuras mínimas, médias e máximas para injeção de alguns materiais.

Tabela 4 - Espessura de parede sugerida para termoplásticos.

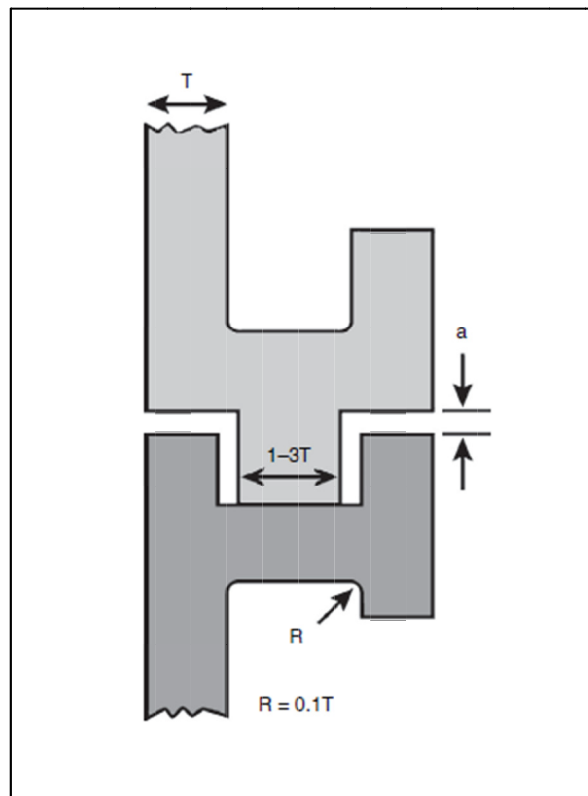
Materiais Termoplásticos	Espessura Mínima (mm)	Espessura Média (mm)	Espessura Máxima (mm)
ABS	0,381	1,574	3,175
Acrílico	0,762	2,286	3,175
Nylon	0,381	1,574	3,175
Policarbonato	1,016	2,362	9,525
PELD	0,508	1,574	6,350
PEHD	0,889	1,574	6,350
Poliestireno	0,762	1,574	6,350

Fonte: Adaptado de Berins (1991, p. 320).

Para Troughton (2008) existem duas importantes características que devem ser consideradas na concepção do produto a ser soldado pelo processo de solda por vibração linear: deve-se planejar uma distância suficiente entre os componentes garantindo o movimento sem interferência durante a vibração; os componentes devem ser suficientemente rígidos para suportar o processo de vibração.

A Figura 7 ilustra o conceito teórico para projeto do friso de solda vibracional, onde a variável (T) corresponde a espessura da parede dos componentes. Essas características garantem a rigidez e folgas suficientes para o processo de solda.

Figura 7 - Ilustração para projeto do friso e pista de solda.

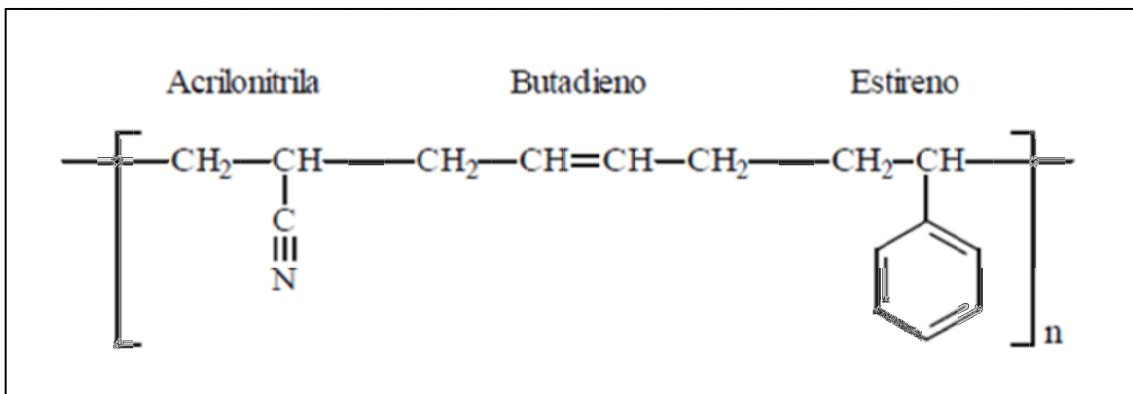


Fonte: Troughton (2008, p. 44).

2.3.4 Compatibilidade entre os polímeros

Segundo Canevarolo (2010) a formação das características estruturais dos polímeros se dá através dos processos de polimerização. Esse processo caracteriza-se pela reação ou conjunto de reações nas quais as moléculas simples reagem formando uma macromolécula. Para os polímeros PMMA e ABS, os principais métodos para obtenção dos polímeros ocorrem através dos processos de polimerização em massa ou em emulsão. As Figuras 8 e 9 apresentam suas respectivas estruturas químicas.

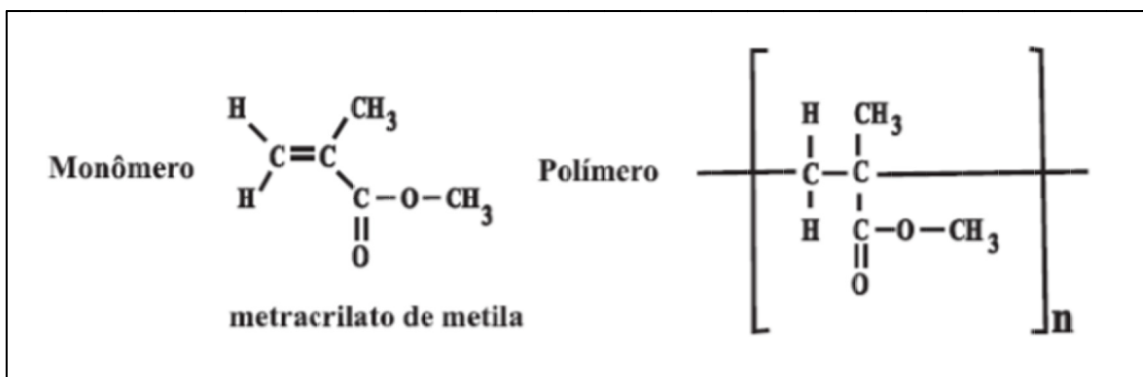
Figura 8 - Estrutura química do ABS.



Fonte: Cristovan (2009, p. 36).

Assim como mencionado na seção 2.2.2 deste capítulo, os polímeros PMMA e ABS são classificados como termoplásticos. Segundo Mengason (1979) e Branson (1999) os termoplásticos são unidos por ligações químicas secundárias que podem ser quebradas por aquecimento, isso permite que as moléculas deslizem em direção umas das outras permitindo que o polímero seja remodelado.

Figura 9 - Estrutura química do PMMA.



Fonte: Mano, (1991, p. 35).

Dentro da família dos termoplásticos, os polímeros PMMA e ABS são classificados como amorfos, onde possuem longas cadeias de moléculas não lineares com grandes grupos secundários. Essas estruturas se comportam como sólidos quando estão abaixo da temperatura de transição vítrea (Tg), contudo, acima desta amolecem permitindo sua remodelação. São essas características que permitem a união entre os polímeros PMMA e ABS durante o processo de solda por vibração linear.

Para Staff (1997) a união entre materiais diferentes influenciam e afetam o comportamento e resistência da junta soldada. No processo de solda por vibração linear, materiais com temperaturas de fusão entre até 38 °C podem ser unidos entre si.

O Quadro 4 apresenta uma visão geral dos polímeros que tem compatibilidade entre si (mostrado com o símbolo “O”).

Quadro 4 - Compatibilidade entre polímeros para o processo de solda vibracional.

	PA6	PA66	PA46	PBT	PET	TPE-E	PC	PC+ABS	ABS	HDPE	LDPE	PMMA	POM	PP	PPS	PS	PVC	SAN
PA6	O	O	O						O									
PA66	O	O	O						O									
PA46	O	O	O															
PBT				O	O	O	O	O	O									O
PET				O	O	O	O	O										
TPE-E				O	O	O	O	O										
PC				O	O	O	O	O	O			O			O			O
PC+ABS				O	O	O	O	O	O			O			O			O
ABS	O	O		O			O	O	O			O				O	O	O
HDPE										O								
LDPE											O							
PMMA							O	O	O			O						
POM													O					
PP														O				
PPS							O	O							O			
PS									O							O		
PVC									O								O	
SAN				O			O	O	O									O

Fonte: DSM (2011, p. 13).

2.3.5 Processo de pré-aquecimento e alívio de tensões

Como dito nos itens anteriores, as temperaturas de transição vítreas (T_g) dos polímeros PMMA e ABS representam um ponto crítico para o processamento. Se estiverem abaixo deste ponto pode-se considerar que os polímeros estão em estado sólido, porém se estiverem acima seu comportamento é considerado líquido/viscoso.

Essas características são importantes quando se deseja unir dois polímeros independentemente do processo. Contudo, como o processo de solda por vibração linear se caracteriza pelo aquecimento superficial das partes, quanto mais próximos da T_g estiverem os materiais mais eficaz será a união.

Além do pré-aquecimento dos materiais para facilitar a união entre as cadeias poliméricas, o processo de alívio de tensões após a união entre as partes é importante para diminuir as possíveis falhas de reestruturação das estruturas. Segundo INDAC (2015) as tensões térmicas e mecânicas decorrentes a transformação do PMMA não podem ser desprezadas, pois são responsáveis pelas falhas de aparência e resistência do material.

Como o PMMA é considerado um material mais frágil que o ABS, as tratativas para alívio de tensões são focadas para esse material. Outro ponto que leva a realizar esse tratamento com foco no PMMA é o fato de que as temperaturas de alívios de tensões não devem ultrapassar as T_g 's dos materiais. Como descrito nos itens 2.2.2.1 e 2.2.2.2, onde a temperatura T_g do PMMA fica entre 85,0 e 105,0 °C e a do ABS entre 110,0 e 125,0 °C, sendo assim as temperaturas de alívio de tensões limitadas à no máximo 105,0 °C.

Ainda segundo INDAC (2015) as temperaturas de alívio de tensões devem ser lentamente aquecidas entre 87,0 °C e 93,0 °C, obedecendo às razões de espessuras conforme Tabela 5. A temperatura de aquecimento não deve ultrapassar 18,0 °C/hora, até atingir a temperatura definida.

Tão importante quanto a aquecimento, o resfriamento também deve ser controlado. Deve-se assegurar um gradiente de resfriamento obedecendo a razão de 12,0 °C/hora onde o ar circulante dentro da estufa não pode sofrer variação acima de $\pm 3,0$ °C. Essa característica proporciona uma uniformidade no resfriamento entre os materiais, com o objetivo de reduzir as tensões entre as ligações poliméricas da junta soldada.

Tabela 5 - Condições de recozimento de peças moldadas.

Razão de redução de espessura	Temperatura de recozimento K (°C)	% de acréscimo no tempo
1:1	360,15 – 366,1 (87,0 – 93,0)	Sem mudança
2:1	353,15 – 359,15 (80,0 – 86,0)	+ 10,0
4:1	347,15 – 353,15 (74,0 – 80,0)	+ 20,0
6:1	340,15 – 346,15 (67,0 – 73,0)	+ 25,0

Fonte: INDAC (2015, p. 02).

3 ETAPAS DE IMPLEMENTAÇÃO DO TRABALHO

3.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentada a proposta de solução relatando a análise da situação atual e as etapas propostas para atuação da causa. O capítulo está associado com os objetivos geral e específicos, além da justificativa, todos mencionados no Capítulo I.

Será apresentado também a metodologia experimental segundo DOE dos parâmetros de máquina e temperaturas de pré-aquecimento e alívio de tensões. Além de uma breve análise de produto, ilustrando a geometria da junta de solda, folgas e as características dos materiais utilizados.

3.2 ANÁLISE DA SITUAÇÃO ATUAL

O objeto de estudo consiste em analisar o comportamento mecânico da união soldada entre os materiais PMMA e ABS. Essa união é uma das etapas do processo produtivo em lanternas traseiras automotivas, desenvolvidas para aplicação em veículos de transporte coletivo e implementos rodoviários.

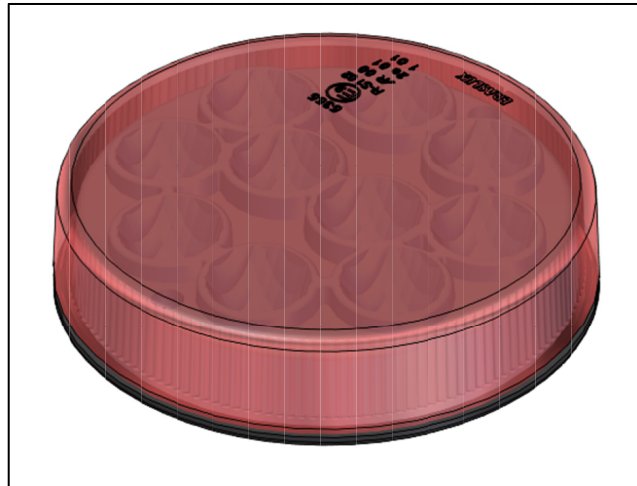
Os componentes que formam uma lanterna são concebidos pelo processo de injeção e, eventualmente passam por processos de acabamento superficial e montagem manual. Embora a lanterna tenha componentes internos, estudo visa analisar apenas a união soldada entre as partes externas. Os materiais empregados na parte traseira da lanterna (carcaça) e na parte frontal (lente) são, respectivamente, ABS e PMMA.

A união entre as partes é realizada pelo processo de solda por vibração linear, que proporciona rapidez e agilidade no fluxo geral de fabricação. Segundo Patham (2011), o projeto necessita passar por análises de material, tamanho do produto, detalhes geométricos da região da junta, taxa de produção, condições de trabalho, requisitos de aplicação, limitações de custos e exigências estéticas, para então ser definido a melhor alternativa.

A Figura 10 ilustra uma das lanternas produzidas atualmente pela empresa. Este produto pode ser utilizado para desempenhar todas as funções de uma

lanterna traseira automotiva: função de posição, de freio, de ré, de direção e de neblina. As mudanças para realizar essas funções se dão pela alteração eletrônica, ótica e de coloração das lentes. Não alterando as características que envolvem a região de solda, mantendo seu perfil plano e perpendicular, conceito simétrico, área de solda de aproximadamente 291,20 mm².

Figura 10 - Lanterna Braslux de geometria simples.



Fonte: Autor (2015).

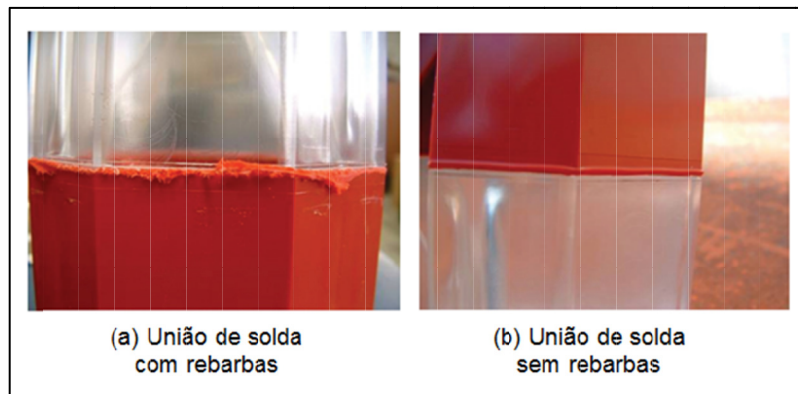
Análise do comportamento mecânico da união soldada busca responder questionamentos sobre: qual é a resistência da junta soldada; se as tensões superficiais geradas no decorrer do processo influenciam na resistência; ou se as variações de parâmetros de processo são importantes para a resistência do produto.

Atualmente o ensaio de resistência de solda é realizado em algumas lanternas com o intuito de compreender o limite que cada modelo suporta. O ensaio consiste na geração de pressão interna por meio de ar comprimido até o rompimento da junta soldada.

Além do comportamento mecânico, é importante analisar as características visuais do cordão de solda. Em algumas situações, os materiais não se fundem ocasionando rebarbas internas e externas ao longo da união soldada, conforme ilustra a Figura 11. Esse material se desprende da união soldada e compromete a aparência do produto. Para Troughton (2008) e Patham (2011), a geração da rebarba ocorre durante a fase I da penetração ou também conhecida como fase de atrito sólido, como visto no item 2.3.2.3 deste trabalho.

A seção a seguir descreve as etapas de intervenção, como também o método no qual serão conduzidas as atividades do trabalho.

Figura 11 - Comparativo entre união soldada com e sem rebarbas.



Fonte: Adaptado de Troughton (2008, p. 45).

3.3 ETAPAS DE INTERVENÇÃO

As etapas de intervenção deste estudo buscam compreender quais fatores interferem na resistência de solda da lanterna. Entre os fatores que cercam o processo, foram considerados os três listados abaixo:

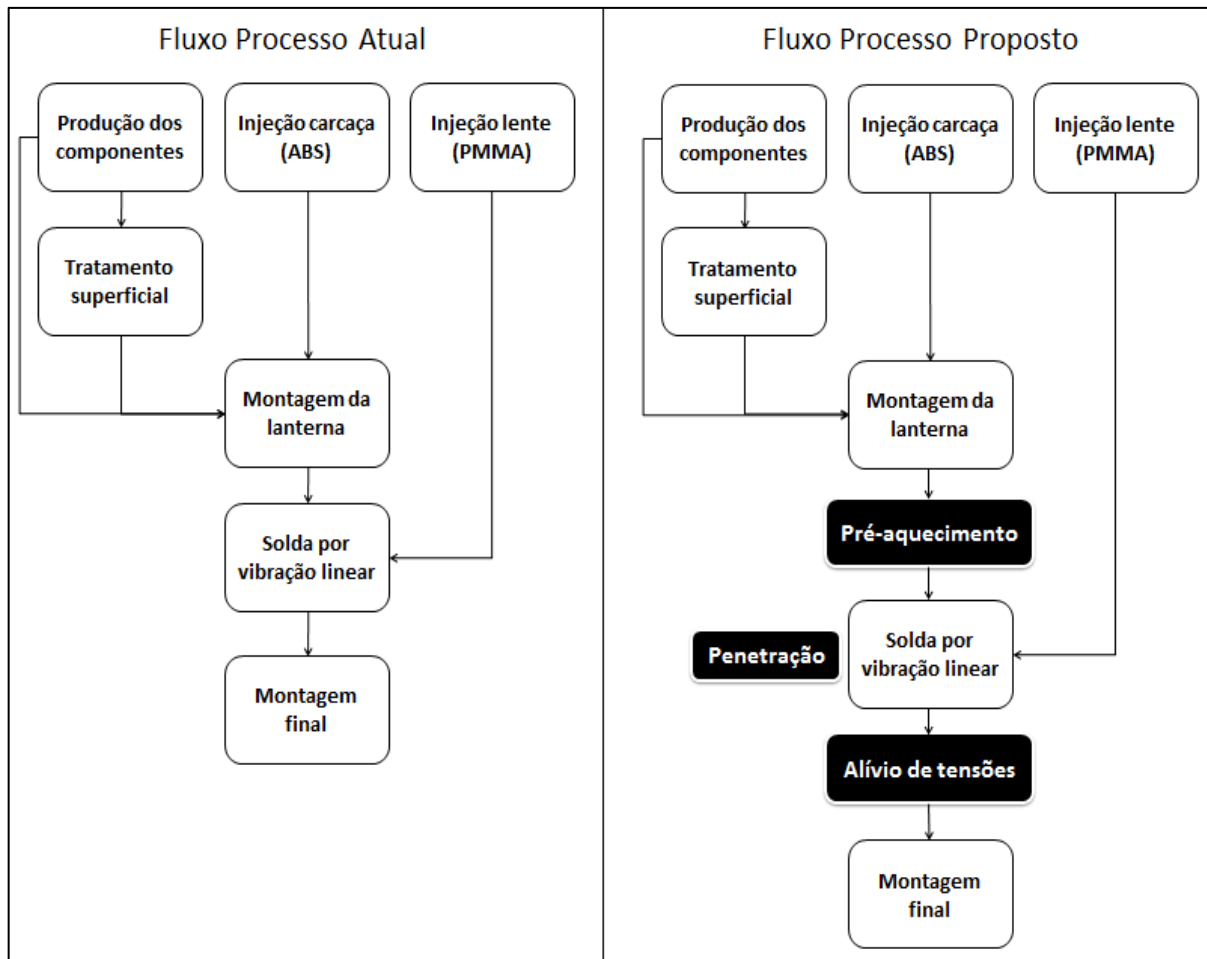
- Temperaturas de pré-aquecimento.
- Quantidade de material a ser fundido.
- Temperaturas de alívio de tensões após a união dos materiais.

Esses fatores representam as principais variáveis que sofrem alterações ao longo do processo de produção de juntas soldadas. As temperaturas no decorrer do processo produtivo sofrem alterações e não são controladas. Já a quantidade de material a ser fundido ou usualmente chamado de penetração, é um parâmetro de máquina que pode ser facilmente alterada para compensar as variações dimensionais dos componentes a serem soldados.

As variações da temperatura ambiente no processo produtivo são caracterizadas como um fator representativo para garantir a repetibilidade da produção, pois podem influenciar tanto na qualidade dos componentes quanto na resistência da junta soldada.

A Figura 12 apresenta o fluxo macro do processo atual e a proposta de intervenção após as análises. A inclusão das etapas de pré-aquecimento e alívio de tensões foram avaliadas por esse estudo, assim como o parâmetro penetração que determina a quantidade de material fundido. Como o valor de penetração é um dos parâmetros de solda que são controlados pela programação do equipamento, não é representado no fluxo a seguir.

Figura 12 - Fluxo de processo atua versus fluxo de processo proposto.



Fonte: Auto, (2015).

A análise foi realizada utilizando um modelo de lanterna com características simétricas para minimizar as possíveis variáveis de geometria de produto. Foi utilizado um conceito de *Design of Experiments* (DOE) ou Planejamento de Experimentos para determinar a quantidade de amostras e interações entre as variáveis.

As amostras foram acondicionadas por um período de tempo, até atingirem as temperaturas de pré-aquecimento antes do processo de solda e após, foram submetidas a novas temperaturas para que fossem submetidas ao processo de alívio de tensões. As temperaturas de pré e pós-aquecimento foram determinadas de acordo com as literaturas citadas nesse estudo, com o intuito de atingir os possíveis extremos obtidos durante o dia-a-dia de produção da lanterna. A validação desse estudo se deu a partir de um comparativo entre as resistências das amostras.

Para a melhor compreensão das etapas desse estudo, as atividades macro estão descritas no Quadro 5.

Quadro 5 - Lista de atividades macro para desenvolvimento do trabalho.

Seq.	Atividades macro
1	Definição o modelo e analisar produto a ser ensaiado.
2	Definição, com base no referencial teórico, as temperaturas de pré-aquecimento e alívio de tensões.
3	Definição sistemática de desenvolvimento conforme DOE/ Planejamento de Experimentos.
4	Condução da produção das amostras.
5	Realização dos testes de análise mecânica.
6	Discussão e conclusão dos resultados.

Fonte: Autor (2015).

3.4 PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS

Para Tahara (2008), o DOE ou Planejamento de Experimentos, é uma técnica com o intuito de planejar, definir e quantificar dados e condições que devem ser coletados durante a execução de uma atividade. Seus principais objetivos se dividem em desenvolver um estudo com a maior precisão estatística de resposta, em um menor custo possível para execução das atividades.

Montgomery (2005) elenca as etapas que foram seguidas para a execução do DOE em uma indústria, conforme descrito no Quadro 6. Essas etapas auxiliam desde a caracterização do problema, até as conclusões do experimento.

Quadro 6 - Etapas para desenvolvimento de um DOE.

Seq.	Etapas do <i>Design of Experiments</i>
1	Caracterização do problema.
2	Escolha dos fatores de influência e níveis.
3	Seleção das variáveis de resposta.
4	Determinação de um modelo de planejamento de experimento.
5	Condução do experimento.
6	Análise dos dados.
7	Conclusões e recomendações.

Fonte: Adaptado de Montgomery (2008).

A caracterização do problema consiste em compreender as principais variáveis que influenciam na resistência mecânica de uma união soldada pelo processo por vibração linear nas condições atuais de produção de uma lanterna traseira automotiva.

Para melhor compreensão desse problema, o objetivo geral desse estudo consiste em analisar o comportamento mecânico ou resistência de uma união termoplástica entre os materiais PMMA e ABS, submetidos ao processo de solda por vibração linear.

Assim como todos os experimentos que envolvem inúmeras variáveis de controle, a análise da resistência de solda está ligada a duas principais famílias de fatores: parâmetros de máquina e variáveis de temperatura. Os fatores de projeto do produto nesse estudo já estão pré-definidos e não podem sofrer alterações, portanto não são considerados variáveis que oscilam ao longo dos procedimentos. Outros fatores que podem influenciar no estudo, como as variáveis de processamento dos componentes, no caso a injeção, foram desconsiderados. Os moldes de injeção já são considerados finais e foram dimensionados conforme projeto.

Os parâmetros de máquina foram analisados e determinados como fatores que limitam a produção das amostras, pois dependem da geometria do produto, folgas de montagem, características dos materiais de cada componente e capacidade do equipamento. Esses parâmetros podem ser controlados durante o processo de solda e são divididos em grupos nomeados por: amplitude, pressão, penetração e velocidade. Já as temperaturas estão ligadas principalmente ao controle dos componentes, na maioria dos casos as temperaturas oscilam de acordo com a temperatura ambiente onde os componentes estão acondicionados e estocados.

Com o intuito de atender o objetivo desse estudo, foram elencados três principais fatores e seus respectivos níveis conforme Tabela 6. Para cada um dos três fatores descrito, foram escolhidos dois níveis para análise:

- Nível I é caracterizado como extremo inferior de cada fator listado. Nível inferior indica baixo valor de penetração entre os materiais, baixa temperatura de pré-aquecimento e alívio de tensões;
- Nível II é caracterizado como extremo superior de cada fator listado. Nível superior indica alto valor de penetração entre os materiais, alta temperatura de pré-aquecimento e alívio de tensões.

Tabela 6 - Principais fatores, limites e níveis das combinações.

Família	Fatores	Limites (grandezas)	Níveis		
			I	II	
Parâmetros de Máquina	A	Penetração	0,5 - 2,5 (mm)	1,0	2,0
Variáveis de temperatura	B	Pré-aquecimento	Valores entre temperatura ambiente até próximo a Tg (°C)	Temp. Amb.	65,0
	C	Alívio de tensões	Valores entre temperatura ambiente até próximo a Tg (°C)	Temp. Amb.	90,0

Fonte: Autor (2015).

Analisando a família de parâmetros de máquina, o fator penetração (A) foi escolhido entre todos os demais parâmetros, pois de acordo com Mengason (1979) e Branson (1999) pode aumentar a quantidade de material fundido entre os polímeros e por sua vez melhorar a uniformidade da junta soldada. Essa característica pode proporcionar um aumento também na resistência de solda. Os níveis I e II, respectivamente 1,0 mm e 2,0 mm, caracterizam os extremos possíveis para garantir uma união estanque (nível I) e o máximo possível para fusão dos materiais segundo projeto do produto (nível II).

Já, para a família variáveis de temperatura, foram elencados dois fatores (B e C) que oscilam no decorrer do processo produtivo, pois não são controlados durante a manufatura dos produtos. Usualmente, ao longo de todo o ano, a temperatura ambiente sofre variações de até 20,0 °C de pendendo das estações, portanto essas controlar essas temperaturas auxiliou a estabelecer um padrão ao processo. O fator pré-aquecimento (B) é um tratamento térmico realizado antes do processo de solda que visa facilitar a fusão entre os polímeros PMMA e ABS, visto que a fricção entre os dois materiais durante o processo de solda tem como objetivo atingir a Tg até se unirem. A escolha dos níveis I (temperatura ambiente) e nível II (65,0 °C) geraram um comparativo do processo atual (onde não há pré-aquecimento, apenas a temperatura ambiente) com uma situação onde a temperatura superficial de 65,0 °C fica próxima das suas Tg's.

O fator de alívio de tensões (C), outro da família variáveis de temperatura, é um processo de tratamento térmico realizado após o processamento dos

componentes, nesse caso realizado após a solda entre os polímeros. Segundo INDAC (2015) esse tratamento térmico, chamado também de recozimento (*annealing*), é realizado em temperaturas abaixo da Tg com objetivo de reduzir as falhas geradas durante a produção e melhorar o arranjo das cadeias poliméricas minimizando as tensões geradas pela solidificação rápida entre os polímeros. Os níveis escolhidos para esse fator dividem-se em temperatura ambiente (nível I) e 90,0 °C (nível II). Para a tratativa do nível II, foram considerados alguns fatores de aquecimento e resfriamento dos materiais, sendo respeitada uma taxa de aquecimento de 18,0 °C/hora e de para o resfriamento uma taxa de 12,0 °C/hora.

Devido ao número de fatores (três) e os seus respectivos níveis (dois), foi utilizado o planejamento fatorial 2^k para desenvolvimento do estudo. A escolha se deu pelo fato de serem estudados apenas dois níveis em cada fator, diminuindo assim o número de unidades experimentais. A utilização do planejamento fatorial 2^k teve como objetivo analisar os principais níveis de cada fator, visto que se quanto maior o número de níveis, melhor e mais complexa fica a análise. A Tabela 7 apresenta o planejamento dos fatores, juntamente com as possíveis combinações de tratamentos. Os sinais (-1) e (+1) representam os níveis de cada fator, sendo o (-1) nível I e o (+1) nível II.

Tabela 7 - Combinações dos tratamentos X Fatores do planejamento.

Combinações dos tratamentos	Fatores do Planejamento		
	A	B	C
(1)	-1	-1	-1
a	1	-1	-1
b	-1	1	-1
ab	1	1	-1
c	-1	-1	1
ac	1	-1	1
bc	-1	1	1
abc	1	1	1

Fonte: Autor (2015).

A combinação de tratamento “a”, por exemplo, é uma unidade experimental (amostras) produzida através da combinação do nível II para o fator de planejamento (A) e o nível I para os fatores (B) e (C). Essas combinações de níveis intercalam

para cada tipo das oito combinações do experimento, proporcionando diferentes formas de produção das amostras.

O planejamento apresenta oito corridas ou combinações de tratamentos, porém foram executadas duas interações para a mesma corrida. Desta forma considera-se o valor de duas réplicas ($n = 2,0$) no experimento. A duplicação das amostras resulta em uma média entre a mesma combinação, a utilização de dois valores para a mesma combinação minimiza a incerteza de se utilizar apenas um único valor para análise. A Tabela 8 apresenta as oito corridas com os respectivos valores de cada fator.

Tabela 8 - Combinações dos tratamentos e os valores de planejamento fatorial.

Combinações dos tratamentos	Fatores do Planejamento		
	[A] Penetração (mm)	[B] Pré-aquecimento (°C)	[C] Alívio de tensões (°C)
(1)	1,0	Temp. amb. 31,5	Temp. amb. 31,5
a	2,0	Temp. amb. 31,5	Temp. amb. 31,5
b	1,0	65,0	Temp. amb. 31,5
ab	2,0	65,0	Temp. amb. 31,5
c	1,0	Temp. amb. 31,5	90,0
ac	2,0	Temp. amb. 31,5	90,0
bc	1,0	65,0	90,0
abc	2,0	65,0	90,0

Fonte: Autor (2015).

Analisando a combinação de tratamento “a” verifica-se que os respectivos níveis I e II foram caracterizados para cada fator de planejamento. Para essa combinação as amostras foram produzidas com o valor de penetração de 2,0 mm, representado pelo nível II. Já para os fatores de pré-aquecimento e alívio de tensões o valor de temperatura de produção foi de 31,5 °C, correspondente à temperatura ambiente durante e ao nível I.

As análises da resistência mecânica de cada fator individual ou em suas interações foram estimadas segundo cálculo fatorial 2^k . Esse método analisa a média das quatro combinações onde o fator está presente em nível superior (nível II), subtraindo pela média das quatro combinações onde o fator está no seu nível

inferior (nível I). As equações 1 a 7 foram utilizadas para determinar os efeitos médios de cada fator.

$$A = \frac{1}{4 \times n} \times [a + ab + ac + abc - (1) - b - c - bc] \quad (1)$$

$$B = \frac{1}{4 \times n} \times [b + ab + bc + abc - (1) - a - c - ac] \quad (2)$$

$$C = \frac{1}{4 \times n} \times [c + ac + bc + abc - (1) - a - b - ab] \quad (3)$$

$$AB = \frac{1}{4 \times n} \times [abc - bc + ab - b - ac + c - a + (1)] \quad (4)$$

$$AC = \frac{1}{4 \times n} \times [(1) - a + b - ab - c + ac - bc + abc] \quad (5)$$

$$BC = \frac{1}{4 \times n} \times [(1) + a - b - ab - c - ac + bc + abc] \quad (6)$$

$$ABC = \frac{1}{4 \times n} \times [abc - bc - ac + c - ab + b + a - (1)] \quad (7)$$

A variável de resposta tem como objetivo determinar a resistência mecânica da união soldada. A escolha do teste de resistência à tração analisa a capacidade de toda a junta de soldada. Além disso, há outra variável, de menor grandeza, que analisa a qualidade visual da junta soldada. Pode-se entender como boa qualidade visual aquela que apresenta uma uniformidade da fusão dos materiais.

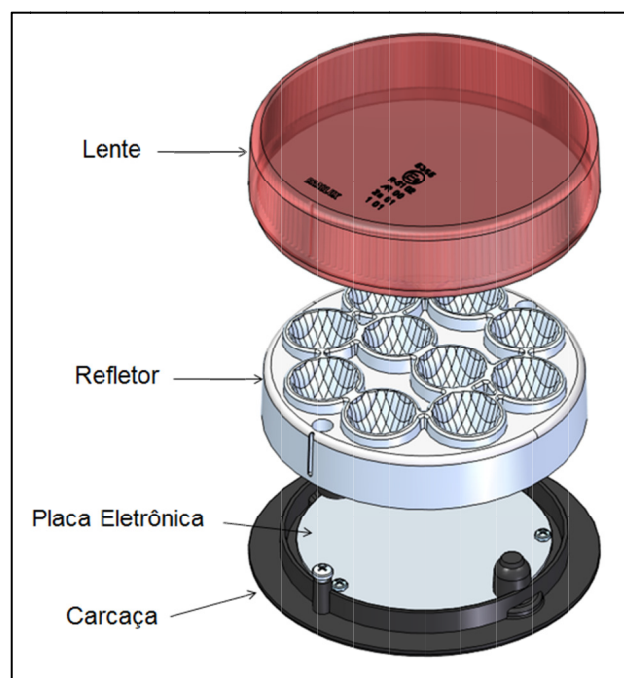
3.5 ANÁLISE DO PRODUTO

A escolha do produto teve intuito de atender as características geométricas de forma plana sem superfícies complexas, geometria simétrica, perfil de solda plano e perpendicular ao longo de todo o produto. Sua área de solda entre os componentes é de 291,20 mm² com um perímetro médio de 294,48 mm. O objetivo da escolha é eliminar variáveis geométricas que possam influenciar nos resultados do estudo.

O produto avaliado é chamado de Lanterna Traseira \varnothing 96 mm devido ao seu diâmetro externo ser caracterizado pela dimensão de 96,00 mm. É utilizado para realizar as funções de indicação traseira em veículos de transporte coletivo e implementos rodoviários. As possíveis configurações desse produto se dividem em atender as funções traseiras de posição, direção, freio, ré e neblina. Para isso sofrem variações nos componentes eletrônicos, ópticos e na coloração da lente, não apresentando variações na geometria da junta soldada.

A Figura 13 apresenta uma vista explodida dos quatro componentes que formam da Lanterna Traseira \varnothing 96,0 mm, seus nomes e respectivos são: Carcaça (ABS), Placa Eletrônica (Material composto), Refletor (ABS com tratamento superficial) e Lente (PMMA).

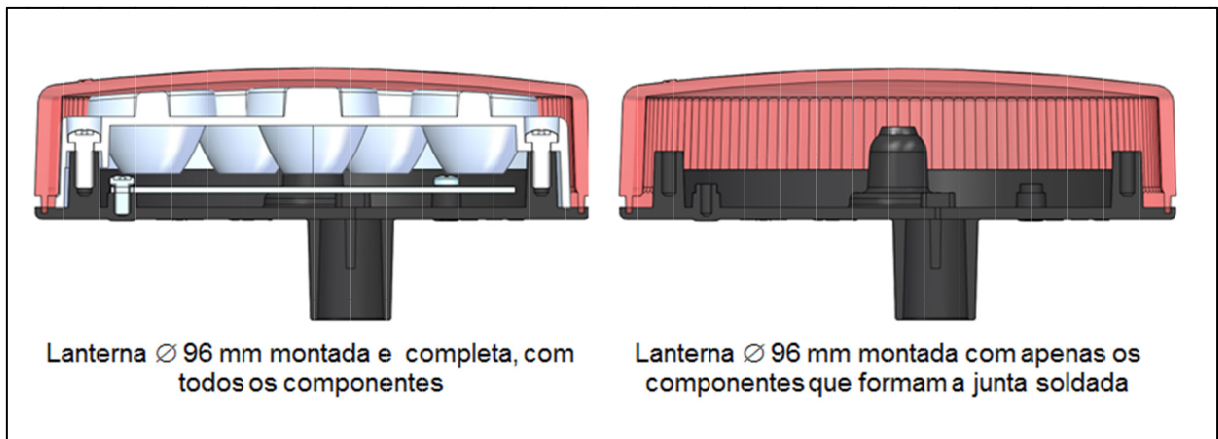
Figura 13 - Vista explodida da Lanterna Traseira diâmetro 96 mm.



Fonte: Autor (2015).

Apesar de o produto ser flexível em suas configurações, podendo variar de função, o estudo centralizou a análise apenas nos componentes que envolvem a união soldada pelo processo de solda por vibração linear, concebidos pela carcaça e lente. A Figura 14 ilustra a vista de corte da lanterna montada com todos os componentes e apenas os componentes que foram analisados nesse estudo (formados pela lente e carcaça). Tanto a carcaça quanto a lente foram processados via injeção, sendo a carcaça injetada em ABS e lente em PMMA.

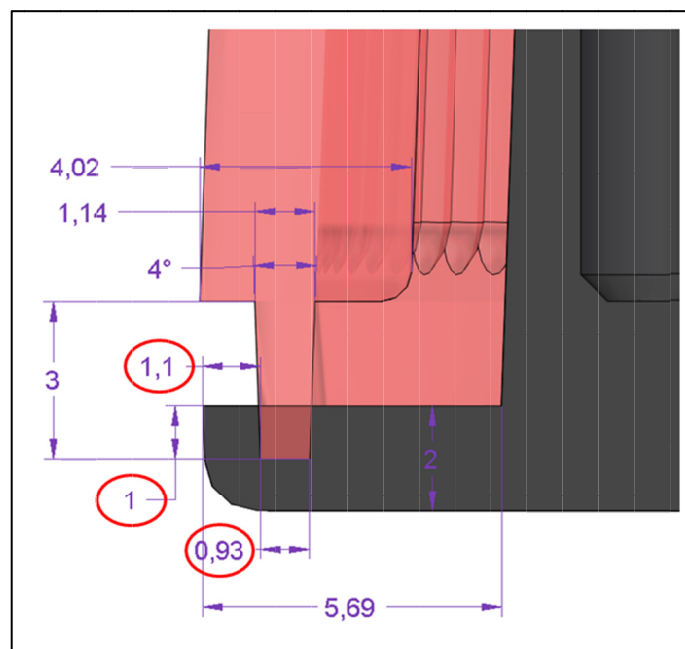
Figura 14 - Comparativo do produto com e sem os componentes internos.



Fonte: Autor (2015).

Independente da variação das funções da lanterna, a região do friso de solda mantém-se a mesma tanto em projeto quanto em moldes de injeção. Essas variações necessitam apenas de troca de postiços que não alteram o seu formato principal e conseqüentemente a região do friso de solda. A Figura 15 ilustra as medidas, folgas e quantidade de material a ser fundido segundo projeto de produto.

Figura 15 - Dimensões da junta soldada.



Fonte: Autor (2015).

É pertinente ressaltar algumas cotas de projeto que são importantes e influenciam tanto no processo quanto na resistência do produto. A cota de 1,1 mm indica a folga de vibração máxima possível para que a lente possa oscilar durante o

processo de fusão dos materiais, indicando também uma limitação do processo onde o parâmetro de amplitude de vibração não pode exceder ao valor já pré-definido por projeto. A cota de 1,0 mm é o valor de material a ser fundido, esse valor pode variar, pois as folgas possibilitam unir mais material que o pré-determinado. Já a cota de 0,93 mm indica a base inicial do friso de solda, é este o valor que determina a área total inicial (291,20 mm²) da junta soldada.

Referente aos materiais empregados na união soldada, o ANEXO B apresenta a ficha técnica com as propriedades físicas, mecânicas, térmicas e óticas do material PMMA, tendo a referência LEP100 do fabricante Acrygel. Esse material é indicado para processos de solda, pois apresenta um índice de fluidez médio, o que facilita a fusão e aumento da temperatura durante o processo de atrito. Já o ANEXO C apresenta as propriedades de processamento, mecânicas, físicas, térmicas e elétricas do material ABS, tendo como referência a nomenclatura Terluran GP-35 do fabricante BASF.

3.6 AMOSTRAS E EQUIPAMENTOS

As amostras foram preparadas segundo planejamento DOE utilizando a metodologia de planejamento de experimentos 2^k, obedecendo as quantidades de 8 (oito) combinações de tratamentos e 2 (duas) réplicas para cada tipo de amostra, totalizando 16 (dezesseis) amostras como apresentado na Tabela 9. A utilização da segunda réplica visa gerar uma média para cada tipo de combinação.

Tabela 9 - Combinações dos tratamentos X Níveis das 1^a e 2^a réplica.

Combinações dos tratamentos	1 ^a Réplica			2 ^a Réplica		
	A	B	C	A	B	C
(1)	-1	-1	-1	-1	-1	-1
a	1	-1	-1	1	-1	-1
b	-1	1	-1	-1	1	-1
ab	1	1	-1	1	1	-1
c	-1	-1	1	-1	-1	1
ac	1	-1	1	1	-1	1
bc	-1	1	1	-1	1	1
abc	1	1	1	1	1	1

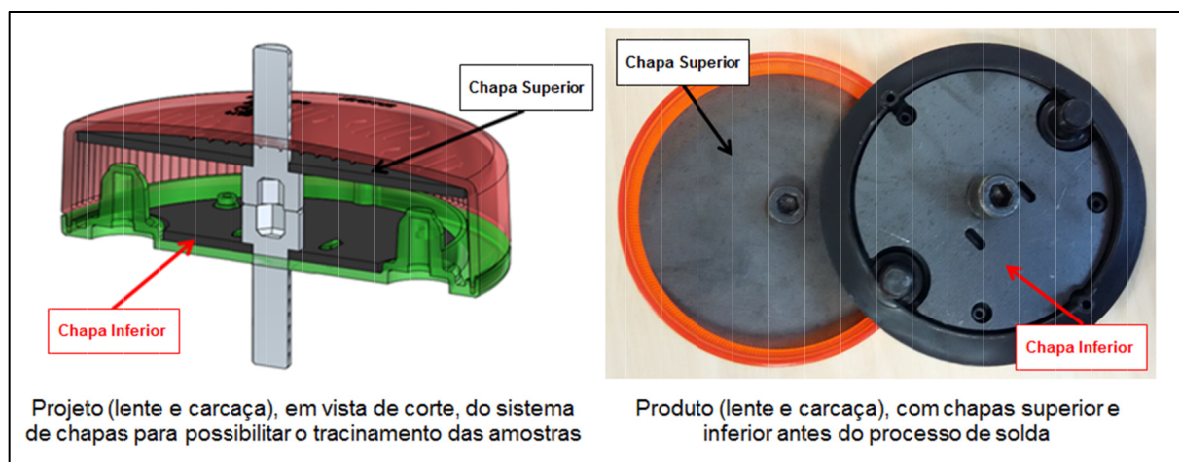
Fonte: Autor (2015).

A combinação de tratamento “abc”, por exemplo, é representada pelo nível II (superior) nos três fatores de planejamento: penetração (A); pré-aquecimento (B); alívio de tensões (C). Isso indica que a amostra foi produzida com 2,0 mm de penetração, 65,0 °C de pré-aquecimento e 90,0 °C de alívio de tensões. Uma segunda amostra foi produzida, respeitando as mesmas condições de níveis e tratamentos, com o objetivo de ter dois resultados para análise. Para as demais combinações, os níveis foram intercalados conforme apresenta a Tabela 9.

Para cada uma das 16 amostras do estudo, foi projetado um sistema de chapas com intuito de possibilitar o tracionamento do produto, conforme ilustra a Figura 16 onde apresenta o projeto em vista de corte e produto antes do processo de solda. Esse sistema foi confeccionado utilizando duas chapas (uma superior e uma inferior) com espessura de 2,65 mm cada, cortadas pelo processo a laser, com o objetivo de copiar a superfície dos componentes e possibilitar o tracionamento perpendicular da junta de solda. Além das chapas, foram utilizados dois parafusos de rosca métrica M8 x 1,25 mm para possibilitar a fixação da amostra no equipamento de tração. O sistema de chapas foi acoplado dentro da lanterna antes da preparação das amostras. Além disso, foi realizada furações tanto na carcaça quanto na lente para possibilitar a saída dos parafusos.

Esse sistema pode influenciar nos resultados, pois não garante que o material seja tracionado perpendicularmente em toda a região do friso de solda. Contudo, esse sistema de chapas foi considerado uma solução cabível para realizar o ensaio, visto que sem esse sistema não seria possível realizar a fixação das amostras no equipamento de tração.

Figura 16 - Projeto e produto das chapas para tracionamento.



Fonte: Autor (2015).

Para atender os 2 (dois) fatores de planejamento que envolvem a variação de temperatura (pré-aquecimento [B] e alívio de tensões [C]) e seus respectivos níveis, foi utilizado um forno de resistência elétrica com circulação de ar constante. O aquecimento ocorreu através da troca de calor por convecção do ar quente sobre as amostras. Contudo, esse sistema foi utilizado apenas para atender as amostras submetidas ao nível II (superior) dos fatores B e C. A Figura 17 apresenta o forno que tem capacidade máxima de aquecer componentes até a temperatura de 300,0 °C, controlado via sistema eletrônico através de um sistema Interface Homem Máquina (IHM).

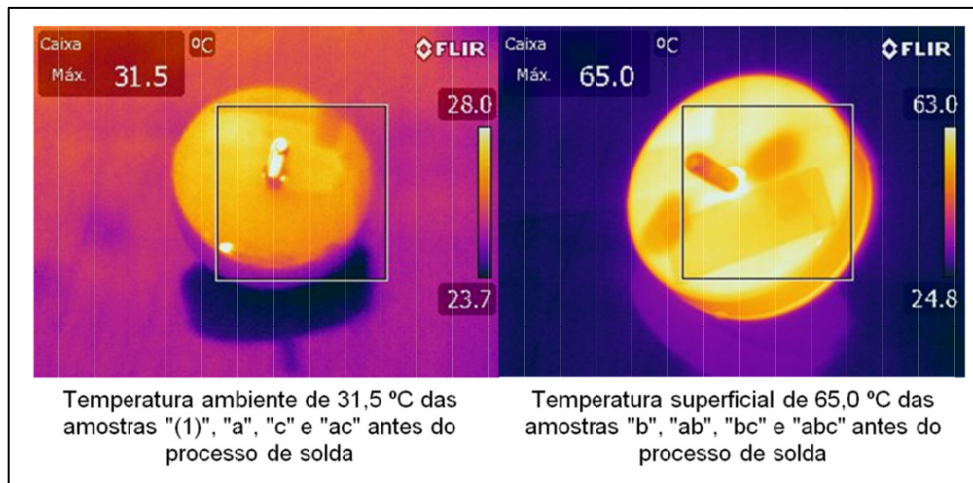
Figura 17 - Forno para aquecimento das amostras.



Fonte: Autor (2015).

A temperatura ambiente durante o decorrer do experimento foi de aproximadamente 31,5 °C, a Figura 18 ilustra a temperatura das amostras “(1)”, “a”, “c e “ac” pois deveriam se submetidas ao processo de solda em temperatura ambiente. Já o fator de temperatura de pré-aquecimento (B), as amostras foram acondicionadas no forno por aproximadamente 10 minutos. Conforme ilustra a Figura 18, as amostras “b”, “ab”, “bc” e “abc” atingiam a temperatura superficial de 65,0 °C.

Figura 18 - Temperatura das amostras "(1)" e "a".



Fonte: Autor (2015).

Para a combinação de tratamento de alívio de tensões (C), as amostras “c”, “ac”, “bc” e “abc” foram submetidas a temperatura de 90,0 °C, após o processo de solda, obedecendo um aumento de temperatura de 18,0 °C por hora. Após atingir a temperatura determinada, o processo de resfriamento também foi controlado obedecendo à perda de temperatura de 12,0 °C por hora. A Tabela 10 apresenta os valores controlados no decorrer do experimento.

Tabela 10 - Acompanhamento das temperaturas de alívio de tensão.

Processo	Horário (h:min)	Temperatura (°C)	Duração (h)
	07:30	31,5	0
Processo de aquecimento para alívio de tensões	07:30 as 08:30	31,5 a 49,5	1,0
	08:30 as 09:30	49,5 a 67,5	1,0
	09:30 as 10:30	67,5 a 85,5	1,0
	10:30 as 11:30	85,5 a 90,0	1,0
Processo de resfriamento para alívio de tensões	11:30 as 12:30	90,0 a 88,0	1,0
	12:30 as 13:30	88,0 a 76,0	1,0
	13:30 as 14:30	76,0 a 64,0	1,0
	14:30 as 15:30	64,0 a 52,0	1,0
	15:30 as 16:30	52,0 a 40,0	1,0
	16:30 as 17:30	40,0 a 31,5	1,0

Fonte: Autor (2015).

Como exemplo de acréscimo de temperatura, as amostras citadas acima foram submetidas a partir da temperatura ambiente de 31,5 °C tendo um aumento de 18,0 °C por hora até atingirem a temperatura de 90,0 °C. O procedimento teve

início as 07:30 horas e término as 11:30 horas, quando iniciou-se o processo de resfriamento. A perda de temperatura também foi controlada, porém esse gradiente teve maior tempo de duração, obedecendo ao decréscimo de 12,0 °C por hora. A duração do processo de resfriamento completou seis horas, das 11:30 horas até as 17:30 horas. Segundo INDAC (2015) esse procedimento visa aliviar as tensões geradas pela fusão dos materiais PMMA e ABS, pois como o processo de união ocorre em um período muito curto de aquecimento e resfriamento a fusão das cadeias poliméricas acabam sendo tensionadas.

As temperaturas de pré-aquecimento (B) e alívio de tensões (C) foram controladas através da medição direta das amostras, com o uso do equipamento por infravermelho FLIR E60. A Figura 19 ilustra o equipamento utilizado para as medições, tendo capacidade de medir temperaturas entre -4,0 à 650,0 °C, exibindo uma imagem de 320 x 240 pixels, em uma escala de espectro infravermelho entre 7,5 à 13,0 μm . O equipamento registra a temperatura em escala e a temperatura máxima dentro da área definida pelo visor, essa medição ilustra apenas a temperatura que o objeto reflete, mensurando apenas a temperatura superficial e não a temperatura interna do objeto.

Figura 19 - Equipamento de medição por infravermelho FLIR E60.



Fonte: Autor (2015).

As amostras foram soldadas utilizando o equipamento de solda por vibração linear conforme Figura 20. Esse equipamento foi projetado para trabalhar com frequência de 240 Hz e com capacidade de exercer 3000 W de potência. Sua

capacidade de amplitude de vibração varia de 0,1 mm à 1,8 mm, essa característica de amplitude é utilizada para unir materiais amorfos.

Figura 20 - Equipamento de solda por vibração linear JM Automação.



Fonte: Autor (2015).

A ferramenta de solda utilizada para efetuar o processo foi desenvolvida exclusivamente para unir o produto Lanterna Traseira \varnothing 96 mm, tendo apenas uma cavidade para produção e copiando exatamente as faces superior (lente) e inferior (carcaça) do produto. A fixação da ferramenta no equipamento se dá pela utilização de parafusos métricos M12 x 1,75 mm com torque de 130,0 N.m com intuito de garantir a montagem correta da ferramenta.

Os parâmetros de solda foram determinados conforme geometria do produto e capacidade do equipamento. A Tabela 11 apresenta os parâmetros fixados para a produção das amostras, esses valores não oscilaram no decorrer do processo produtivo. Os valores de mesa Recuada, início de solda e aproximação foram determinados com base nas características da ferramenta de solda, já os valores de pressão, velocidade, tempo de resfriamento e amplitude foram determinados a partir da geometria do produto. Esses parâmetros foram testados antes do início do estudo, onde apresentaram características de processamento consideradas boas para unir os dois materiais. O parâmetro de amplitude de vibração apresentou limitações devido à folga de 1,0 mm entre a lente e a carcaça, ilustrada na Figura 15 do Capítulo III.

Tabela 11 - Parâmetros fixos para produção das amostras.

	Parâmetros de solda por vibração linear	Valores correspondentes
Parâmetros de posição da ferramenta de solda	Mesa recuada	280,00 mm
	Início de solda	47,20 mm
	Aproximação	67,20 mm
Parâmetros dependentes da capacidade do equipamento e geometria do produto	Resfriamento	1,0 s
	Velocidade	20,0 %
	Pressão	20,0 %
	Amplitude	1,0 mm

Fonte: Autor (2015).

Os testes de tracionamento foram realizados no equipamento de tração EMIC Série 23 disponibilizado pela Universidade de Caxias do Sul. Esse equipamento de ensaios mecânicos desenvolvido para aplicações de média resistência mecânica com capacidade máxima de tração de 200 kN (20000 kgf), dupla coluna autoportante e acionamento através de fusos de esferas recirculantes pré-carregadas com sistema de colunas guias cilíndricas.

Os ensaios de tração só puderam ser realizados com o auxílio do conjunto de chapas desenvolvido nesse trabalho, isso possibilitou que houvesse uma região central e rígida para fixação das amostras. Esse sistema auxiliou para que a lanterna fosse tracionada sem que fossem criados corpos de prova.

4 RESULTADOS

4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão apresentados o método de preparação das amostras e ilustrados os equipamentos utilizados para execução das atividades, bem como os ensaios para execução e os respectivos resultados obtidos nos testes.

4.2 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste item são apresentados os resultados correspondentes aos ensaios de tração das amostras. O planejamento fatorial 2^3 permite comparar três efeitos simultaneamente, com utilização de duas réplicas para cada combinação de tratamento houve uma melhor análise dos resultados, pois se caracteriza pelo somatório dos dois resultados para o cálculo, conseqüentemente não analisando apenas um valor.

Os resultados referentes ao ensaio são apresentados na Tabela 12, onde cada amostra foi tracionada até a ruptura total. Os somatórios das réplicas representam o total de força para tracionar as amostras da mesma combinação de tratamento.

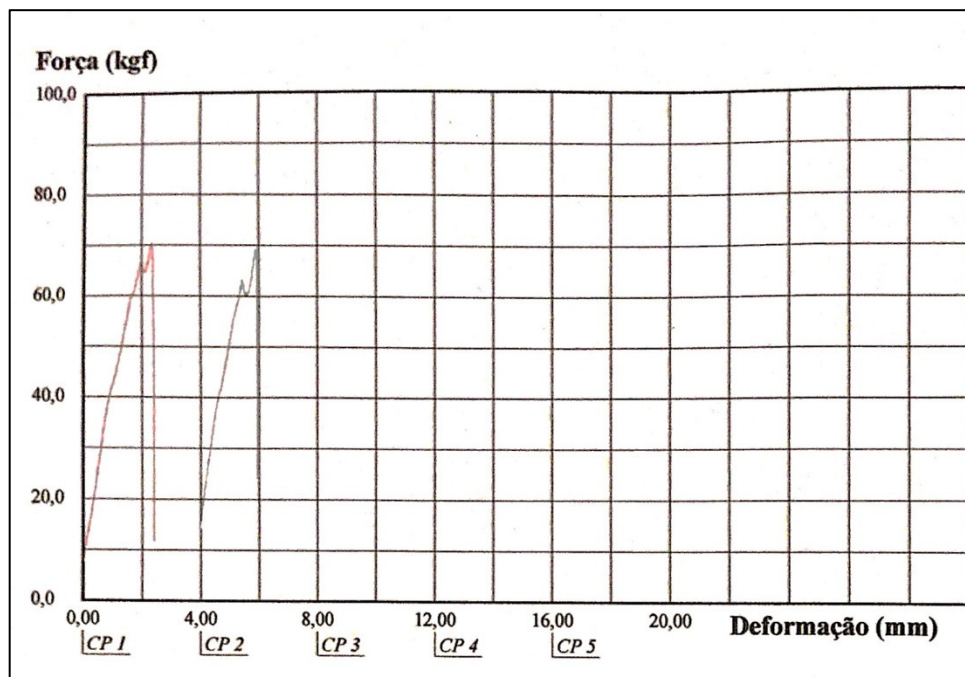
Tabela 12 - Resultados dos ensaios de tração.

Combinações dos tratamentos	Réplicas		Média (kg.f)	Somatório (kg.f)
	1ª (kg.f)	2ª (kg.f)		
(1)	71,00	69,00	70,00	140,00
a	75,00	77,00	76,00	152,00
b	72,00	76,00	74,00	148,00
ab	78,00	86,00	82,00	164,00
c	75,00	84,00	79,50	159,00
ac	82,00	95,00	88,50	177,00
bc	84,00	80,00	82,00	164,00
abc	88,00	85,00	86,50	173,00
			TOTAL	1277,00

Fonte: Autor (2015).

Sem a análise quantitativa do planejamento 2^k e apenas analisando as médias das combinações de tratamento, é possível verificar que o menor valor de tração está na combinação “(1)”, apresentando uma média de resistência a tração de 70,00 kg.f. Essa combinação representa o estado atual de processamento das lanternas na empresa, onde o produto é soldado sem controle de temperatura (a temperatura ambiente) e com apenas 1,00 mm de penetração da junta soldada. A Figura 21 ilustra o gráfico de força (kg.f) *versus* a deformação (mm) da combinação de tratamento “(1)”, onde apresenta a força máxima para as duas réplicas.

Figura 21 - Gráfico de força X deformação das amostras (1).



Fonte: Autor (2015).

Já a combinação de tratamento “ac” apresentou maior média com o valor de 88,50 kg.f, seguido pela combinação “abc” onde apresentou um valor de 86,50 kg.f. Essas duas combinações apresentam em comum os fatores de penetração à 1,0 mm e alívio de tensões à 90,0 °C, indicando que a proposta de intervenção apresentada nesse trabalho pode influenciar na resistência da junta soldada. Enfatizando essa análise, é possível verificar que conforme os fatores são intercalados nas amostras, à resistência da junta soldada aumenta. O gráfico do ensaio é apresentado no ANEXO D desse trabalho.

Além dos valores de resistência a tração, foi possível comparar o tempo de solda para todas as amostras. Esse tempo expressa o valor de vibração dos

componentes, não levando em consideração o tempo de posicionamento dos componentes na ferramenta de solda, o tempo de movimentação da mesa, o tempo de resfriamento após processo de solda e o tempo de retirada da peça pronta. A Tabela 13 apresenta esses valores, como também a média para cada combinação de tratamento.

Tabela 13 - Tempos de solda

Combinções dos tratamentos	Tempo de solda (s)		Média (s)
	1ª Réplica	2ª Réplica	
(1)	4,30	4,20	4,25
a	5,50	5,50	5,50
b	4,20	4,20	4,20
ab	5,40	5,60	5,50
c	4,40	4,40	4,40
ac	5,80	5,70	5,75
bc	4,20	4,50	4,35
abc	5,70	5,60	5,65

Fonte: Autor (2015).

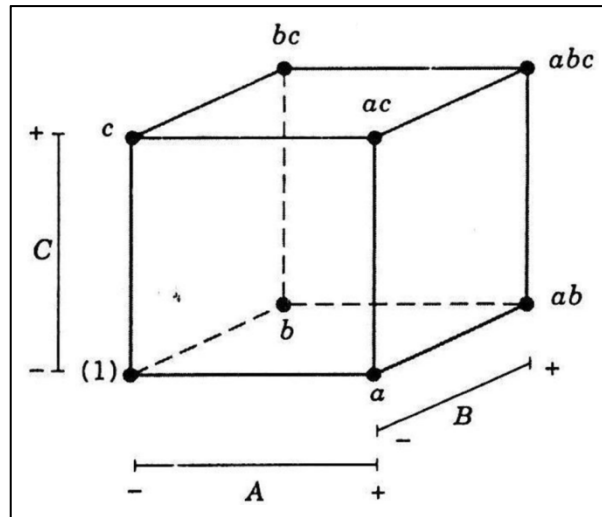
É possível verificar que nas amostras onde o fator de penetração (A) estava no nível II (2,0 mm), o tempo de solda apresentou um acréscimo de aproximadamente 1,0 segundo. Indicando que os demais fatores não influenciam no tempo de solda da lanterna. Contudo, esse valor é tão pequeno que pode ser desconsiderado como um agravante no processo produtivo.

Analisando o estudo com base na teoria de planejamento de experimentos 2^k , pode-se compreender que as oitos possíveis combinações ((1), a, b, ab, c, ac, bc, abc) de amostras equivalem a cada vértice de um cubo, conforme apresenta a Figura 22. Além de representar as possíveis combinações, a Figura 22 ilustra os níveis a serem aplicados em seus respectivos planos. Esses planos especificaram os três fatores: (A) penetração; (B) pré-aquecimento; (C) alívio de tensões.

A combinação (1) representa a amostra onde foram aplicados os níveis inferiores de tratamento: penetração de 1,00 mm; pré-aquecimento à temperatura ambiente (31,5 °C); alívio de tensões à temperatura ambiente (31,5 °C). Para as demais sete combinações (a, b, c, ab, ac, bc, abc) foram aplicadas interações que intercalam níveis superiores e inferiores, nessas interações pode-se estimar uma média da soma das quatro combinações de tratamento representadas pelo lado

direito do cubo e subtrair pela média das quatro combinações de tratamento representadas no lado esquerdo do cubo. Esses cálculos foram representados pelas equações 1 a 7, apresentadas no Capítulo III.

Figura 22 - Combinações dos tratamentos em análise geométrica.



Fonte: Montgomery (2008).

A Tabela 14 apresenta os resultados dessas médias de todas as sete interações multiplicadas pela razão $\frac{1}{4 \times n}$, onde “n” representa o número de réplicas para cada uma das combinações.

Tabela 14 - Resultados dos efeitos médios do planejamento fatorial.

Combinações de tratamentos/ Efeitos médios	Resultados
A	6,875
B	2,625
C	8,625
AB	-0,625
AC	-0,125
BC	-2,375
ABC	-1,625

Fonte: Autor (2015).

Os resultados apresentados na Tabela 14 indicam uma estimativa numérica dos efeitos que podem influenciar na resistência de solda a tração da Lanterna Traseira \varnothing 96 mm. As combinações A e C apresentaram resultados superiores às demais aplicações, respectivamente 6,875 e 8,625. Isso indica que se variar a

penetração de 1,0 mm (nível inferior) para 2,0 mm (nível superior) há um aumento na resistência. Por outro lado se variar a temperatura de alívio de tensões de 31,5 °C (temperatura ambiente – nível inferior) para 90,0 °C (nível superior) representa um maior aumento na resistência à tração.

Contudo os valores dessa estimativa apenas indicam que esses efeitos apresentam maior representatividade sobre os demais. Para validar a importância dessas combinações foi utilizada a análise de variância, também apresentada pelo estudo de planejamento fatorial 2³. Essa análise consiste no cálculo de probabilidade desses efeitos influenciarem na resistência a tração da junta soldada. As equações 8 a 16 apresentam o somatório ao quadrado e do erro que cada combinação apresentou.

$$SQA = \frac{[a + ab + ac + abc - (1) - b - c - bc]^2}{n \times 2^k} \quad (8)$$

$$SQB = \frac{[b + ab + bc + abc - (1) - a - c - ac]^2}{n \times 2^k} \quad (9)$$

$$SQC = \frac{[c + ac + bc + abc - (1) - a - b - ab]^2}{n \times 2^k} \quad (10)$$

$$SQAB = \frac{[abc - bc + ab - b - ac + c - a + (1)]^2}{n \times 2^k} \quad (11)$$

$$SQAC = \frac{[(1) - a + b - ab - c + ac - bc + abc]^2}{n \times 2^k} \quad (12)$$

$$SQBC = \frac{[(1) + a - b - ab - c - ac + bc + abc]^2}{n \times 2^k} \quad (13)$$

$$SQABC = \frac{[abc - bc - ac + c - ab + b + a - (1)]^2}{n \times 2^k} \quad (14)$$

$$SQT = \frac{[\Sigma 1^{a} \text{rép}\{(1)^2 + \dots + abc^2\}] + [\Sigma 2^{a} \text{rép}\{(1)^2 + \dots + abc^2\}] - [\Sigma TOTAL]^2}{n \times 2^k} \quad (15)$$

$$SQE = [SQT - SQA - SQB - SQC - SQAB - SQAC - SQBC - SQABC] \quad (16)$$

Para cada uma das combinações foram estimados os graus de liberdade que representaram. Essa estimativa teve o objetivo determinar o erro total das combinações e a partir disso determinar a probabilidade que esses efeitos poderão influenciar no resultado do estudo.

A Tabela 15 apresenta os resultados da análise de variância para cada combinação de tratamento, o erro (equação 16) e o total (equação 15) da soma quadrática, os graus de liberdade, a média quadrática e o fator de variância.

Tabela 15 - Resultados da análise de variância.

Fonte de variação	Soma quadrática (SQx)	Graus de liberdade	Média quadrática (MQx)	Fator de variância (F ₀)
A	189,06	1,00	189,06	8,33
B	27,56	1,00	27,56	1,21
C	297,56	1,00	297,56	13,12
AB	1,56	1,00	1,56	0,07
AC	0,06	1,00	0,06	0,00
BC	22,56	1,00	22,56	0,99
ABC	10,56	1,00	10,56	0,47
ERRO	181,50	8,00	22,69	-
TOTAL	730,44	15,00	-	-

Fonte: Autor (2015).

Segundo a metodologia de análise de variância, foi estimada uma probabilidade 95,0% dos resultados estarem corretos. Com base nessa probabilidade e no número de graus de liberdade calculado, foi determinado segundo tabela ilustrada no ANEXO E, que todo o resultado que apresentar o fator acima de 5,32 influencia no aumento da resistência a tração.

Desta forma, a análise de variância indica com uma probabilidade de 95,0% de assertividade que, os fatores A e C, respectivamente representados pela penetração e alívio de tensões, têm influencia na resistência a tração da Lanterna Traseira Ø 96 mm. Isso foi evidenciado, pois os fatores A e C apresentaram respectivamente 8,33 e 13,12.

A Tabela 16 ilustra todas as combinações de tratamento comparando com o fator padrão de variância, se os tratamentos afetam os não no aumento da resistência à tração.

Tabela 16 - Análise dos fatores de variação.

Fonte de variação	Fator padrão de variância	Fator de variância da amostragem	Conclusão
Penetração (A)		8,33	Aumenta à resistência a tração
Pré-aquecimento (B)		1,21	Não aumenta à resistência a tração
Alívio de tensões (C)		13,12	Aumenta à resistência a tração
Interação AB	5,32	0,07	Não aumenta à resistência a tração
Interação AC		0,00	Não aumenta à resistência a tração
Interação BC		0,99	Não aumenta à resistência a tração
Interação ABC		0,47	Não aumenta à resistência a tração

Fonte: Autor (2015).

Por outro lado, se fosse aumentado à probabilidade de assertividade do estudo para 99,0%, o fator padrão de variância seria de 11,26. Desta forma apenas o fator de alívio de tensões teria influência no aumento da resistência a tração da junta soldada.

5 CONCLUSÕES

O desenvolvimento desse trabalho teve como objetivo principal compreender e analisar o comportamento mecânico de uma união soldada entre os polímeros PMMA e ABS. Esta junta de solda é unida através do processo de solda por vibração linear. Para realizar esse estudo foi apresentada situação atual do fluxo produtivo e uma nova proposta onde os materiais fossem submetidos a temperaturas de pré-aquecimento e alívio de tensões.

Para auxiliar no desenvolvimento e preparação do estudo, foi utilizada a metodologia de DOE, tendo como referência o planejamento experimental 2^k . Essa metodologia, juntamente com a revisão bibliográfica e literaturas existentes, auxiliaram na escolha do produto a ser ensaiado, na quantidade de amostras, nos fatores e níveis a serem comparados, no método de obter os resultados e na análise final dos ensaios.

Com os auxílio da metodologia DOE, foram estabelecidos três fatores para análise com dois níveis para cada fator: penetração (1,00 mm e 2,00); pré-aquecimento (temperatura ambiente de 31,5 °C e 65,0 °C); alívio de tensões após o processo de solda (temperatura ambiente de 31,5 °C e 90,0 °C). Foram ensaiadas 16 amostras variando esses fatores e níveis até ser realizado o ensaio de tração para comparar qual fator e nível apresentam maior influência no comportamento mecânico da junta soldada.

Em busca de atender os objetivos, tanto geral quanto específicos desse estudo, pode-se concluir que as variáveis estudadas apresentaram influência na resistência a tração da junta soldada. Com base na metodologia, foram realizadas duas análises de resultados onde concluíram que os fatores de aumento da penetração e alívio de tensões à temperatura de 90,0 °C aumentam a resistência à tração das juntas soldadas.

Pode-se compreender que o fator de penetração, em nível superior, aumenta à resistência a tração da união soldada, devido à quantidade de material fundido é maior, conseqüentemente garantindo melhor soldabilidade da junta. Já para o fator de alívio de tensões, onde apresentou melhor resultado que o fator de penetração, aumenta a resistência de solda devido ao rearranjo molecular proporcionado pelo aumento de temperatura. Essa característica diminui as tensões geradas pelo

processo de solda ao redor da junta soldada, devido ao resfriamento rápido do processo.

Diante desses resultados, pode-se concluir com probabilidade de 95,0 % de assertividade que a proposta de intervenção atingiu êxito apenas se for incluso a etapa de alívio de tensões após o processo de solda. Além de evidenciar que o aumento da penetração influencia na resistência e é importante para garantir uma melhor qualidade de fusão dos materiais.

Como sequência do trabalho sugere-se avaliar outras geometrias de uniões soldadas ou até variar as temperaturas e tempos de tratamento, além de aumentar o número de amostras para cada fator analisado. Essas sugestões, auxiliadas pela metodologia DOE, poderão proporcionar uma melhor compreensão dos resultados e viabilizar o estudo proposto.

REFERÊNCIAS

- APME (Association of Plastic Manufacturers in Europe). **A material for choice for the automotive industry**, Summer 1999. Disponível em: <<http://www.resol.com.br/textos/Plastics,%20a%20material%20of%20choice%20for%20the%20automotive%20industry.pdf>>. Acesso em: 11 abr. 2015, 19:50.
- ASHBY, Michael; JONES, David. **Engenharia de materiais**. 2 ed. Rio de Janeiro: Elsevier Editora Ltda, 2007. Vol 02, 436 p.
- BERINS, Michael. **Plastics engineering handbook**: Of the society of the plastics industry. 5 ed. Norwell, Estados Unidos da América: Springer US, 1991. 845 p.
- BIELOMATIK. **Plastic welding technology in the field**: Comparison of welding Technologies with the same welding part, Alemanha. Disponível em: <http://www.bielomatik.com/bkmauto/comparison_welding_technologies_en_10/>. Acesso em: 04 mai. 2015, 19:50.
- BOMTEMPO, José Vitor. **A competição em plásticos de engenharia**. Rio de Janeiro: FINEP, 2001.
- BRASLUX. **A empresa, conheça a Braslux**. Disponível em: <<http://www.brasluxautopecas.com.br/pt/a-empresa/conheca-a-braslux>>. Acesso em: 08 abr. 2015, 20:00.
- BRANSON, Ultrasonic Corporation. **Polymers**: Characteristics na compatibility for ultrasonic assembly, Estados Unidos da América, 1999. Disponível em: <http://www.emersonindustrial.com/en-US/documentcenter/BransonUltrasonics/Plastic%20Joining/Ultrasonics/Technical%20Info/PW-1_Polymer-Ch-Weldability.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2015, 19:00.
- CANEVAROLO, Jr, Sebastião Vicente. **Ciências dos Polímeros**: um texto básico para tecnólogos e engenheiros. 3 ed. São Paulo: Editora Artliber, 2010.
- CHANDA, Manas; ROY, Salil K.. **Plastics technology handabook**: Plastics engineering series. 4 ed. Estados Unidos da América: CRC Press, 2006. 896 p.
- COSTA, Anahi Pereira da et al. A review of welding technologies for thermoplastic composites in aerospace applications, **Journal of Aerospace Technology and Management**, São José dos Campos, vol. 4, nº 3, p. 255-265, jul.-sep. 2012. Disponível em: <http://www.researchgate.net/profile/Jose_Tarpani/publication/259558052_A_Review_of_Welding_Technologies_for_Thermoplastic_Composites_in_Aerospace_Applications/links/0deec5155d62f3f0cc000000.pdf>. Acesso em: 17 mai. 2015.
- CRISTOVAN, Fernando Henrique. **Preparação e caracterização de blendas de PANI/ABS**. São Carlos, 2009.

DAS, K. Chapal; NAYAK, C. Gnesh; Vinay; FRIEDRICH. Vibration welding of amorphous thermoplastic nanocomposites. **Materials and Manufacturing Processes**, Estados Unidos da América: Taylor & Francis Group, v. 27, n. 7, p. 786-790, 2012. Disponível em:

<<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10426914.2011.648251#.VYsJLBFFB D8>>. Acesso em: 25 abr. 2015, 18:45.

DSM. **Vibration welding guide**: Vibration welding of engineering plastic, Holanda. 2011. Disponível em:

<https://www.dsm.com/content/dam/dsm/arnite/en_US/documents/5037_DSM_Vibration_Welding_Guide_def.pdf>. Acesso em: 04 mai. 2015, 20:30.

DUKENE INTELLIGENT ASSEMBLY SOLUTIONS. **Guide to ultrasonic plastics assembly**, Estados Unidos da América, 2011. Disponível em:

<<http://www.dukane.com/us/Documents/DesignGuides/Guide%20To%20US%20Plastic%20Assembly.pdf>>. Acesso em: 26 abr. 2015, 21:30.

EMIC, Equipamentos Para Ensaio Mecânicos Destrutivos. **Produtos: Série 23** EMIC, Brasil, 2015. Disponível em:

<http://www.emic.com.br/Produtos+Mostra/4/77/236/Maquina+universal+para+ensaios+mecanicos+de+tracao+_compressao+_flexao+_etc+_modelo+EMIC+23_200+_eletromecanica+_microprocessada+_marca+INSTRON_EMIC/>. Acesso em: 02 nov. 2015, 22:00.

EVONIK, Industries AG. **Polymers & Lasers**: Laser Application Center. Disponível em:

<<http://www.vestamid.com/sites/dc/Downloadcenter/Evonik/Product/VESTAMID/en/brochures/Polymer%20and%20Laser.pdf>>. Acesso em: 20 abr. 2015. 22:00.

FORWARD TECHNOLOGY. **About Linear Vibration Welding**, Estados Unidos da América. Disponível em: <<http://www.forwardtech.com/plastic-assembly/vibration-welders/about-linear-vibration-welding>>. Acesso em: 31 abr. 2015, 15:00.

GREWELL, David. Welding of plastics: Fundamentals and new developments. **International Polymer Processing**, Estados Unidos da América, v. 22, nº 1, p. 43-60, mar. 2007. Disponível em: <<http://www.hanser-elibrary.com/doi/abs/10.3139/217.0051>>. Acesso em: 28 abr. 2015, 23:00.

HARPER, Charles. **Handbook of plastic processes**. Maryland, Estados Unidos da América: Wiley-Interscience, 2006. 760 p.

HARPER, Charles. **Modern plastics handbook**: the complete guide to properties and performance, 2 ed. São Francisco, Estado Unidos da América: McGraw-Hill Professional, 1999.

INDAC. **Alívio de tensões de chapas acrílicas**, Brasil. 2015. Disponível em: <<http://www.indac.org.br/alivio-tensoes-distensionamento-chapas-acrilicas.php>> . Acessado em: 20 ago. 2015, 20:00.

FRANTZ, Jeffrey. Como escolher um método para a junção de itens plásticos. **Revista Plástico Industrial**, Brasil, nº 189, p. 32-41, mai. 2014.

HERMAIS, Carlos A.. Polímeros e a indústria automobilística. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Paulo, v. 13, nº 2, p. 107-114, abr.-jun. 2003.

MANO, Eloisa Biasotto. **Polímeros como matérias de engenharia**. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1991.

MENGASON, James. **The effects of polymer structure on ultrasonic weldability**, Estados Unidos da América: Branson Sonic Power Company, 1979.

MEDINA, Heloisa. Materiais avançados: novos produtos e novos processos na indústria automobilística. **Revista Produção**, Brasil, v. 8, nº 1, p. 29-44, jul. 1998.

MONTGOMERY, Douglas. **Design and analysis of experiments**. 6 ed. John Wiley & Sons, 2005.

PAL, Kaushik; PANWAR, Vinay; FRIEDRICH, Sven. An Investigation on Vibration Welding of Amorphous and Semicrystalline Polymers. **Materials and Manufacturing Processes**. Estados Unidos da América: Taylor & Francis Group, mar. 2015.

Disponível em:

<<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10426914.2015.1019111>>. Acesso em: 11 abr. 2015, 21:45.

PATHAM, Bhaskar. Thermoplastic vibration welding: Review of process phenomenology and processing–structure–property interrelationships, **Polymer Engineering and Science**, Índia, v. 51, nº 1, p. 01-22, jan. 2011. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pen.21784/abstract>>. Acesso em: 28 abr. 2015, 19:00.

REIS, Thiago. **Com o aumento da frota, país tem 1 automóvel para cada 4 habitantes**. São Paulo: G1, 2014. Disponível em: <<http://g1.globo.com/brasil/noticia/2014/03/com-aumento-da-frota-pais-tem-1-automovel-para-cada-4-habitantes.html>>. Acesso em: 12 abr. 2015, 20:44.

SEBASTIAN, Joerg. **Plastics in automotive engineering: Developing and designing plastic components**. Alemanha: IAV, 2011.

SEHANOBISH, Kalyan. **Engineering plastics and plastics composites in automotive applications**. Estados Unidos da América: Sae International. 2009.

STAFF, P.D.L. **Handbook of plastics joining: A practical guide**. William Andrew, 1 ed. Norwich, Estados Unidos da América: Plastics Design Library, 1997.

SZETEIOVÁ, Katarína. **Automotive materials plastics in automotive markets today**. Eslováquia: Slovak University of Technology Bratislava, 2010. Disponível em: <http://www.mtf.stuba.sk/docs//internetovy_casopis/2010/3/szeteiova.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2015, 22:30.

TAHARA, Creusa Sayuri. **Planejamento de Experimentos (DOE)**. Brasil: Instituto de Gestão de Desenvolvimento de Produtos, 2008. Disponível em: <<http://www.portaldeconhecimentos.org.br/index.php/por/Conteudo/Planejamento-de-Experimentos-DOE>>. Acesso em: 15 ago. 2015, 22:00.

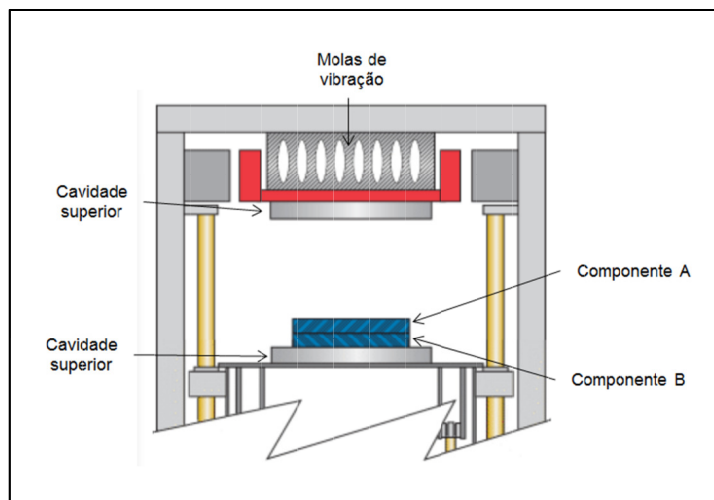
TROUGHTON, Michael. **Handbook of plastics joining: A practical guide**. 2 ed. Norwich, Estados Unidos da América: Plastics Design Library, 2008.

VARGA, József; SCHLARB, Alois; EHRENSTEIN, W. Gottfried. Vibration welding of alpha and beta isotactic polypropylenes: Mechanical properties and structure, **Express Polymer Lett**, Hungria, v. 2, nº 3, p. 148-156, jan. 2008. Disponível em: http://www.expresspolymlett.com/articles/EPL-0000572_article.pdf>. Acesso em: 27 abr. 2015, 21:00.

ANEXO A – FASES DO PROCESSO DE SOLDA POR VIBRAÇÃO LINEAR

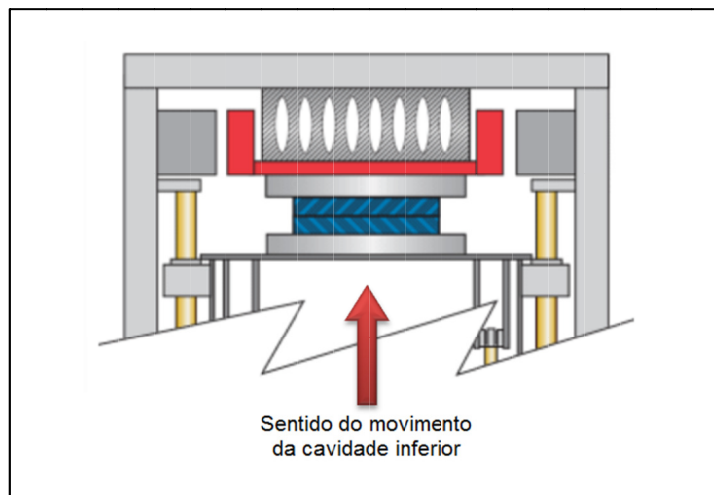
As fases do processo podem ser divididas em cinco etapas:

1. ETAPA: na maioria das aplicações, os componentes são posicionados conforme figura abaixo (componente B fixado na cavidade inferior e componente A em cima). Em outros casos, o componente A é fixado na cavidade superior com o auxílio de sistemas pneumáticos de fixação.



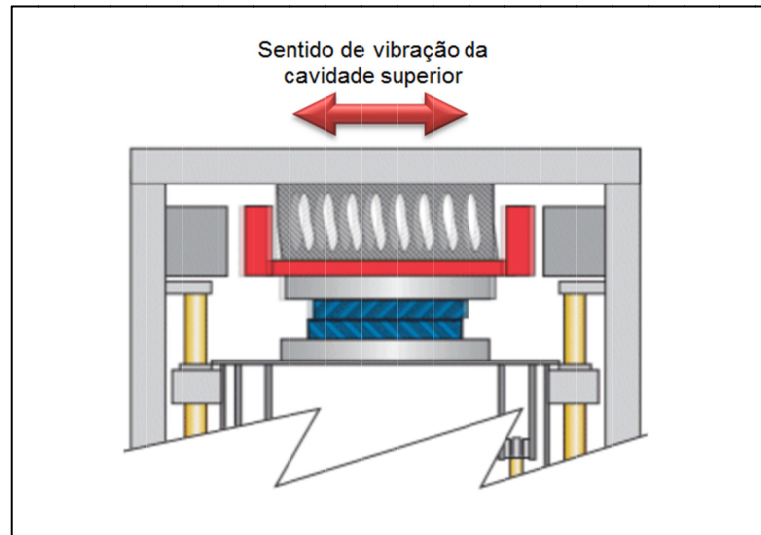
Fonte: Adaptado de Forward Technology (2015).

2. ETAPA: a cavidade inferior se movimenta até chegar à cavidade superior (na maioria das aplicações esse sistema é acionado via cilindro hidráulico). Os componentes são pressionados garantindo sua posição correta para união das partes.



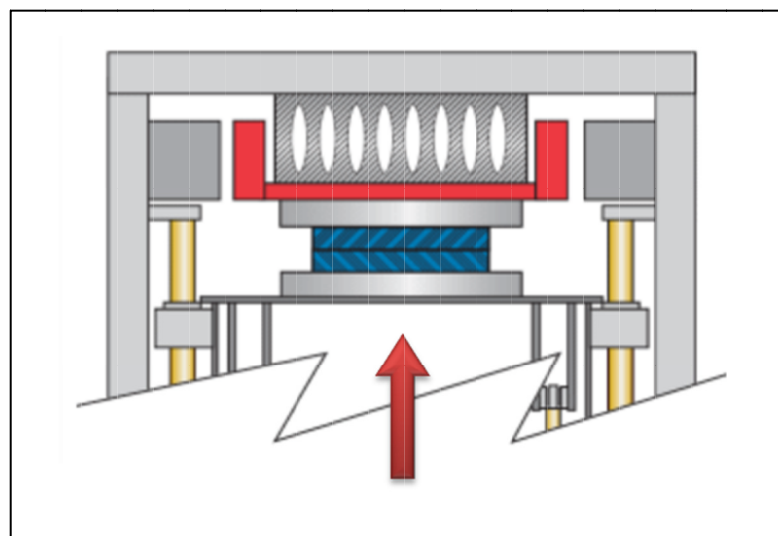
Fonte: Adaptado de Forward Technology (2015).

3. PASSO: ainda pressionada pela cavidade inferior, a cavidade superior vibra, oscilando no sentido horizontal conforme ilustração abaixo. Esse movimento é o gerador de atrito e calor entre os componentes, proporcionando a fusão entre os mesmos.



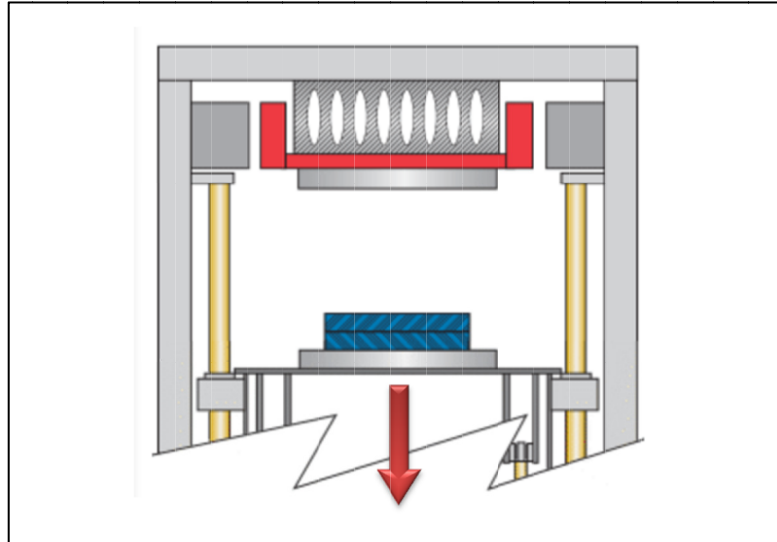
Fonte: Adaptado de Forward Technology (2015).

4. PASSO: após ocorrer a fusão entre os dois componentes, a vibração pára e os componentes continuam pressionados por mais alguns segundos. O objetivo é garantir a posição final de fixação até a solidificação da união soldada.



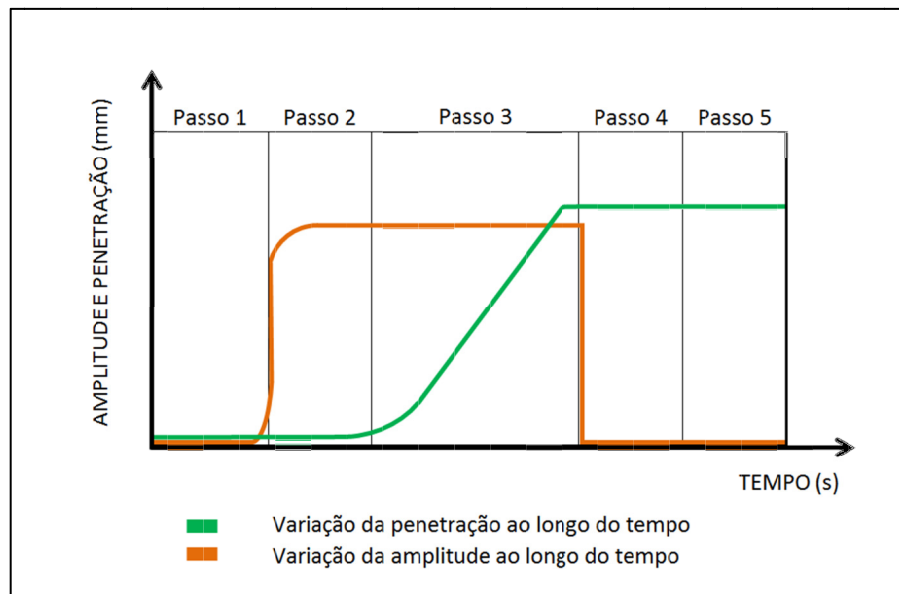
Fonte: Adaptado de Forward Technology (2015).

5. PASSO: depois de completada a solidificação, a mesa retorna para a posição inicial e caracteriza o final do ciclo. O ciclo total desse processo pode variar conforme equipamento e material a ser soldado, contudo na maioria dos casos o tempo varia entre 20 a 60 segundos.



Fonte: Adaptado de Forward Technology (2015).

Os cinco passos são ilustrados na figura abaixo ao longo do tempo. A variável amplitude aumenta partir passo da aproximação entre os componentes e permanece ativa até atingir o valor de penetração máximo. A penetração ocorre quando a aproximação entre os dois componentes for zero, dependendo da programação do equipamento isso pode ocorrer entre os passos 2 e 3.



Fonte: Autor (2015).

ANEXO B – FICHA TÉCNICA PMMA ACRIGEL LEP100



FICHA TÉCNICA **Acrygel® LEP100**

DESCRIÇÃO Média fluidez, boa resistência térmica e boa relação rigidez/impacto.
Principais aplicações: iluminação automotiva, utilidades domésticas e peças técnicas.

	Método	Valores Típicos	Unidades
Propriedades Físicas			
Índice de Fluidez (230°C / 3,8 kg)	ASTM D-1238	3,8	g/10 min
Densidade	ASTM D-792	1,19	g/cm ³
Propriedades Mecânicas			
Resistência à Tração (ruptura)	ASTM D-638	70	MPa
Alongamento (ruptura)	ASTM D-638	4	%
Impacto IZOD Entalhado	ASTM D-256	14	J/m
Dureza Rockwell (escala M)	ASTM D-785	95	-
Propriedades Térmicas			
Temperatura de Deflexão Térmica (1,8 MPa; 3,2mm)	ASTM D-648	96	°C
Temperatura de Amolecimento Vicat (10N, 120°C/h)	ASTM D-1525	108	°C
Temperatura de Amolecimento Vicat (50N, 50°C/h)	ASTM D-1525	100	°C
Contração do Moldado	ASTM D-955	0,3 - 0,6	%
Propriedades Óticas			
Transmitância	ASTM D-1003	92	%
Índice de Refração	ASTM D-542	1,49	-

Moldagem por Injeção

Condições de Processamento Recomendadas*

Pré-secagem: 85°C / 4 horas

Temperatura do Molde: 60°C

Zonas da Injetora	Zona 1 (Bico de Injeção)	Zona 2	Zona 3	Zona 4 (Alimentação)
Temperatura (°C)	235	240	230	220


*Valores indicativos. As condições ideais devem ser determinadas experimentalmente para cada processo e dependem do desenho da peça, número de cavidades, projeto do molde e máquina.

Nota:

Valores típicos. Não devem ser usados com a intenção de especificação. As normas acima são referências literárias sobre a metodologia analítica utilizada. Corpos de prova injetados sob condições ideais de processamento. As propriedades podem ser afetadas pela quantidade e tipos de pigmentos. As propriedades óticas informadas são válidas para produto natural sem tingimento.

Todas as informações presentes são dadas de boa fé e não é uma garantia do produto. Contate nosso departamento técnico para especificação do produto. Consulte nosso departamento técnico sobre necessidades de conformidade e homologação em normas nacionais e internacionais.

ANEXO C – FICHA TÉCNICA ABS BASF TERLURAN GP-35

Product Information	Terluran[®] GP-35 ABS	 BASF The Chemical Company
04/2005		

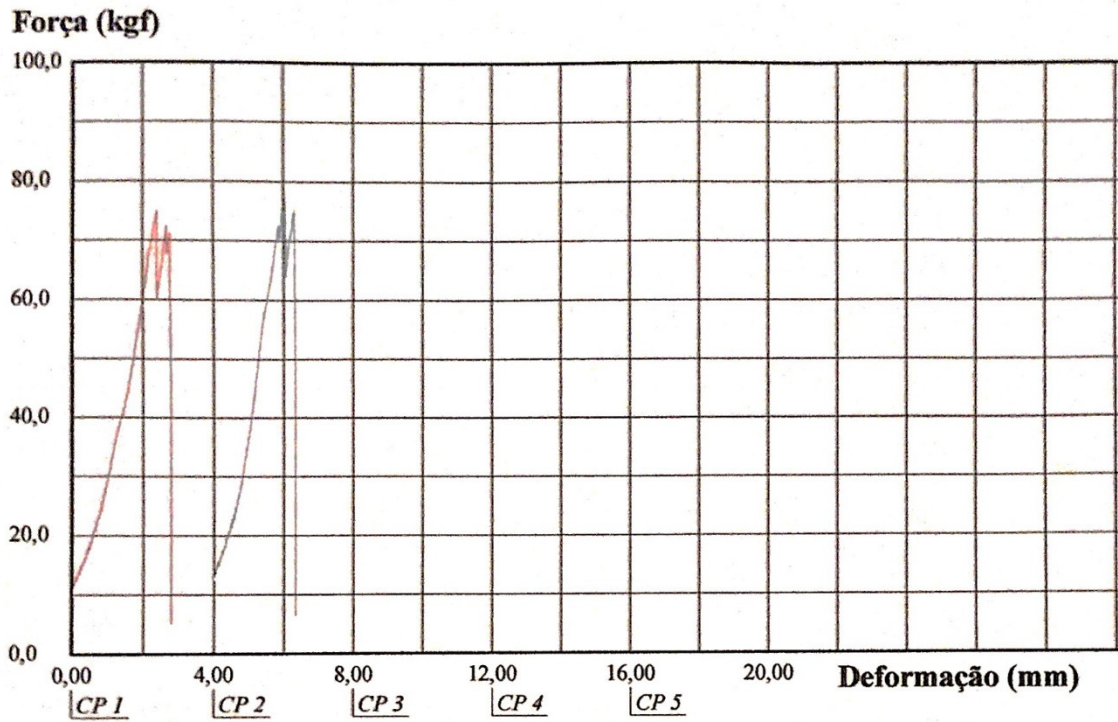
Terluran[®] GP-35

 The Chemical Company

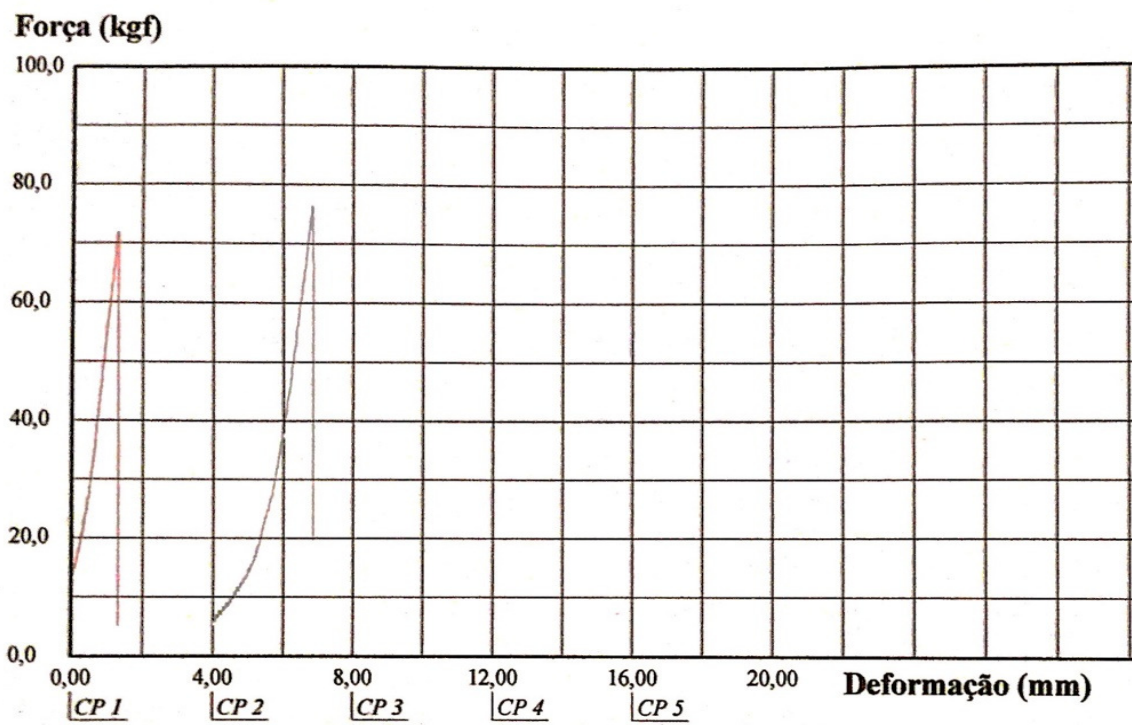
Typical values ¹⁾ at 23°C	Test method ²⁾	Unit	Values
Properties			
Polymer abbreviation	-	-	ABS
Density	ISO 1183	kg/m ³	1040
Filler content: Glass fiber (GF)	-	%	-
Water absorption, equilibrium in water at 23°C	similar to ISO 62	%	0.95
Moisture absorption, equilibrium 23°C/50% r.h.	similar to ISO 62	%	0.24
Processing			
Processing: Injection moulding (M), Extrusion (E), Blow moulding (B)	-	-	M
Melt volume-flow rate MVR	ISO 1133	cm ³ /10min	34
Temperature	ISO 1133	°C	220
Load	ISO 1133	kg	10
Pre-drying: Temperature	-	°C	80
Pre-drying: Time	-	h	2 - 4
Melt temperature, injection moulding	-	°C	220 - 260
Mould temperature, injection moulding	-	°C	30 - 60
Moulding shrinkage, free, longitudinal	-	%	0.4 - 0.7
Flammability			
UL94 rating at 1.6 mm thickness	UL 94	class	HB
Automotive materials (thickness d ≥ 1mm)	-	-	+
Mechanical Properties			
Tensile modulus	ISO 527-1/-2	MPa	2300
Yield stress, 50 mm/min	ISO 527-1/-2	MPa	44
Yield strain, 50 mm/min	ISO 527-1/-2	%	2.4
Nominal strain at break, 50 mm/min	ISO 527-1/-2	%	12
Flexural strength	ISO 178	MPa	65
Charpy impact strength (23°C)	ISO 179/1eU	kJ/m ²	125
Charpy impact strength (-30°C)	ISO 179/1eU	kJ/m ²	90
Izod notched impact strength (23°C)	ISO 180/1A	kJ/m ²	22
Izod notched impact strength (-30°C)	ISO 180/1A	kJ/m ²	7
Charpy notched impact strength (23°C)	ISO 179/1eA	kJ/m ²	19
Charpy notched impact strength (-30°C)	ISO 179/1eA	kJ/m ²	7
Izod notched impact strength, method A (23°C)	ASTM D 256	J/m	240
Ball indentation hardness	ISO 2039-1	MPa	99
Force	ISO 2039-1	N	358
Duration	ISO 2039-1	s	30
Thermal properties			
HDT A (1.80 MPa), measured using dried specimens	ISO 75-1/-2	°C	94
HDT B (0.45 MPa), measured using dried specimens	ISO 75-1/-2	°C	99
Vicat softening temperature VST/A/50	ISO 306	°C	102
Vicat softening temperature VST/B/50	ISO 306	°C	95

ANEXO D – GRÁFICOS DO ENSAIO DE TRAÇÃO

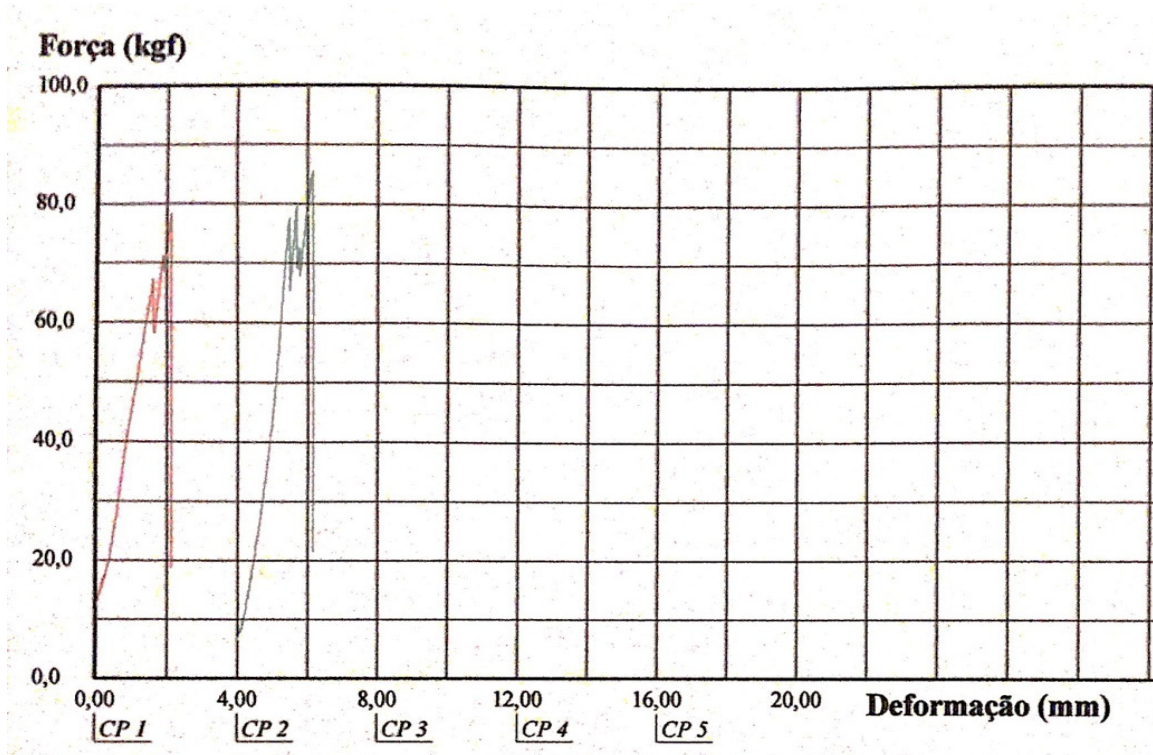
- Combinação de tratamento “a”:



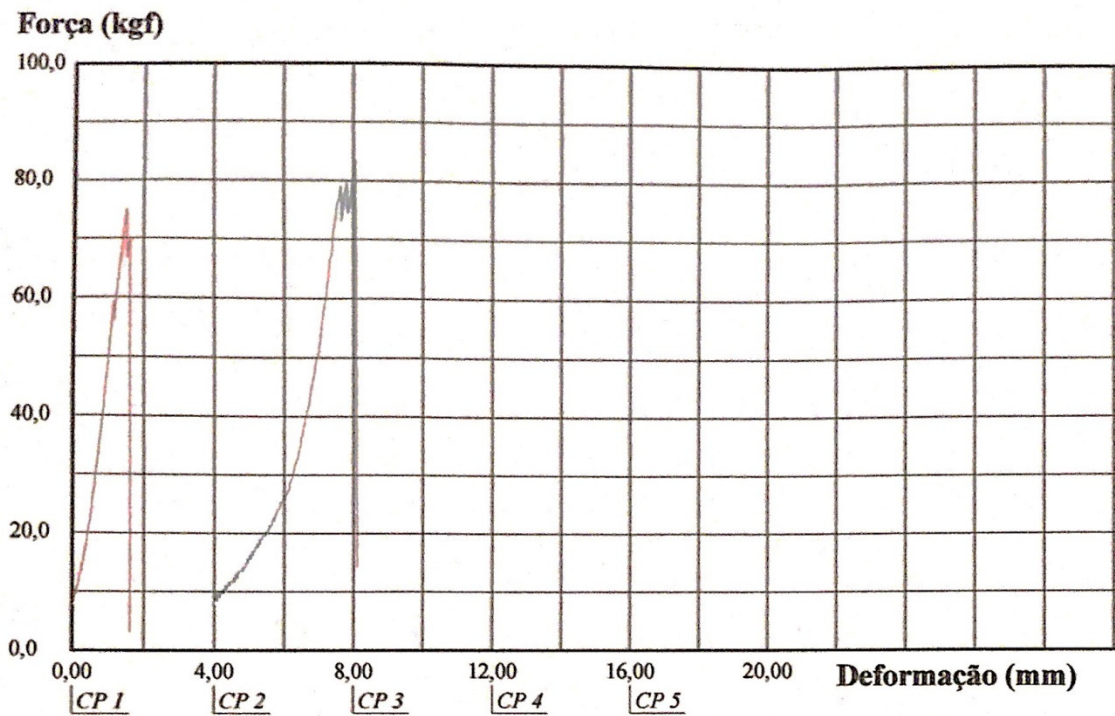
- Combinação de tratamento “b”:



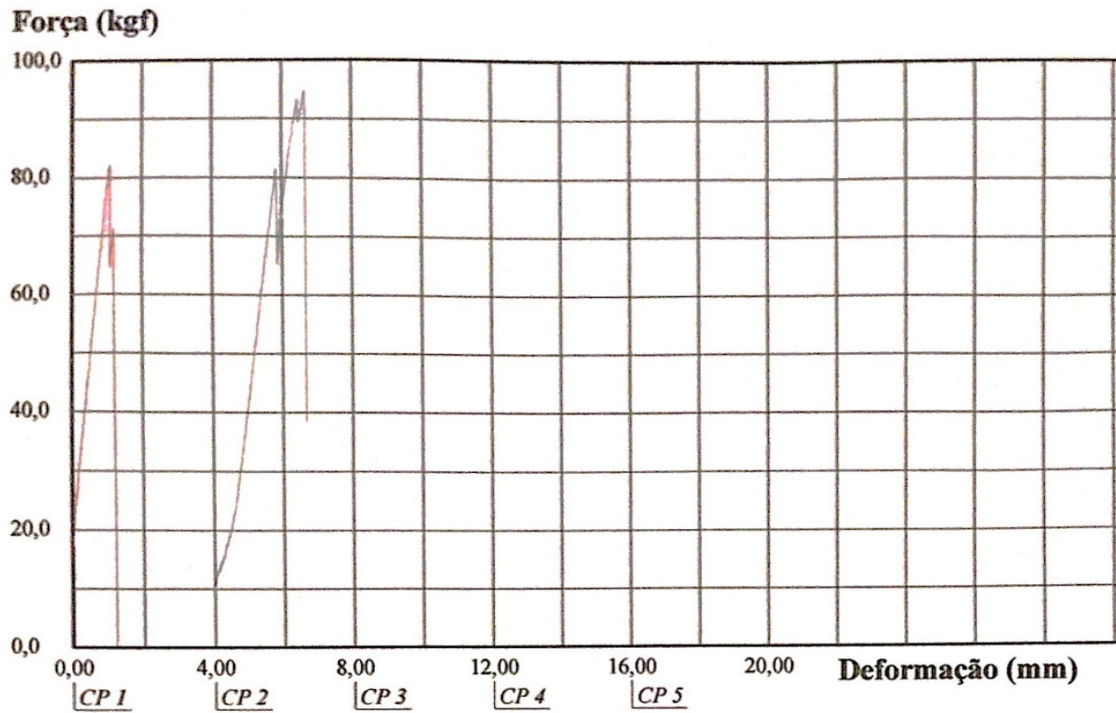
- Combinação de tratamento "ab":



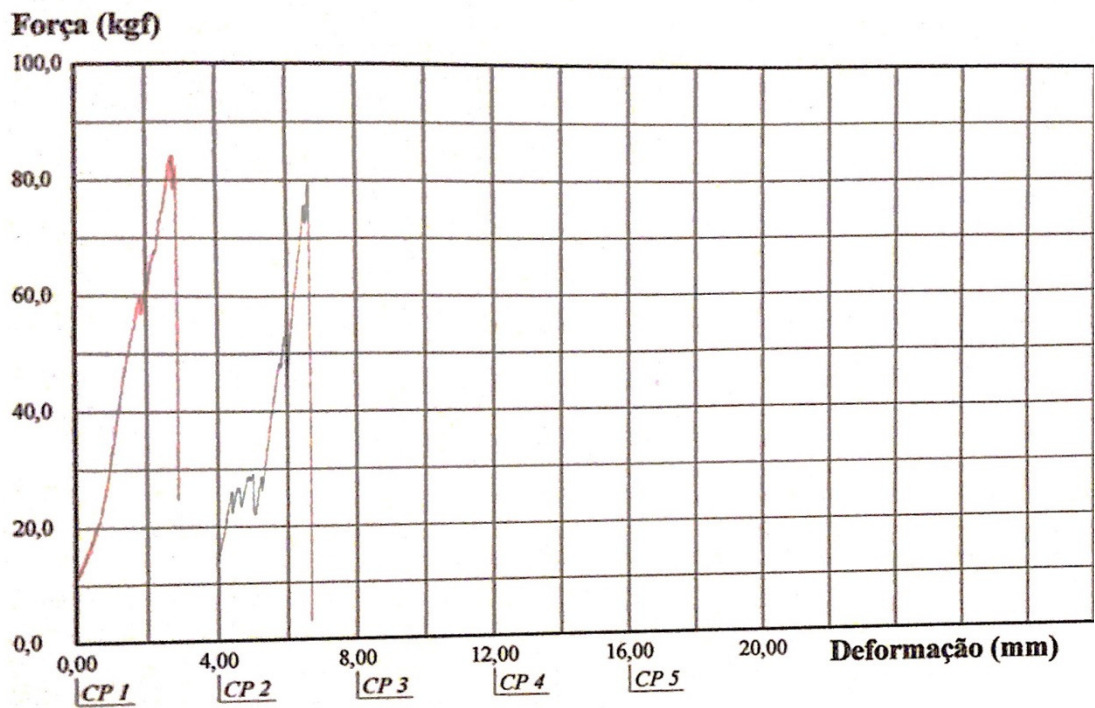
- Combinação de tratamento "c":



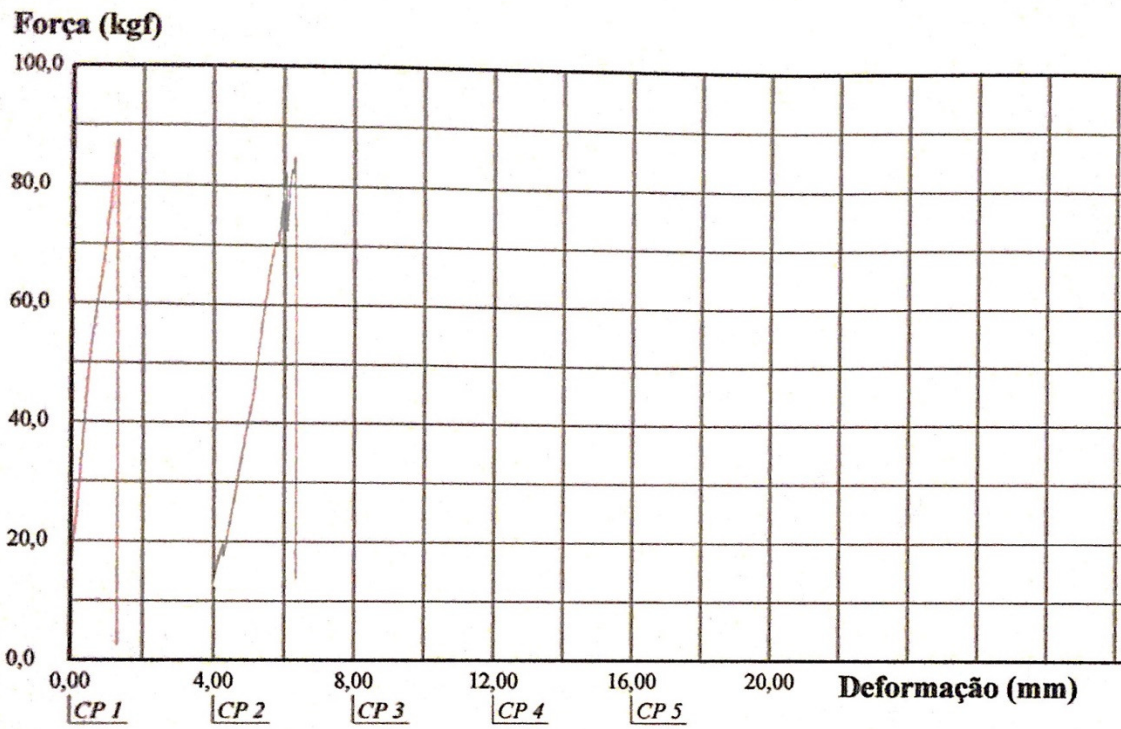
- Combinação de tratamento "ac":



- Combinação de tratamento "bc":



- Combinação de tratamento "abc":



ANEXO E – PONTOS PERCENTUAIS DA DISTRIBUIÇÃO F 95,0%

Tabela V Pontos Percentuais f_{α, v_1, v_2} da Distribuição F (continuação)

v_2	v_1	Graus de liberdade para o numerador (v_1)																			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	∞	
1	161,4	199,5	215,7	224,6	230,2	234,0	236,8	238,9	240,5	241,9	243,9	245,9	248,0	249,1	250,1	251,1	252,2	253,3	254,3		
2	18,51	19,00	19,16	19,25	19,30	19,33	19,35	19,37	19,38	19,40	19,41	19,43	19,45	19,45	19,46	19,47	19,48	19,49	19,50		
3	10,13	9,55	9,28	9,12	9,01	8,94	8,89	8,85	8,81	8,79	8,74	8,70	8,66	8,64	8,62	8,59	8,57	8,55	8,53		
4	7,71	6,94	6,59	6,39	6,26	6,16	6,09	6,04	6,00	5,96	5,91	5,86	5,80	5,77	5,75	5,72	5,69	5,66	5,63		
5	6,61	5,79	5,41	5,19	5,05	4,95	4,88	4,82	4,77	4,74	4,68	4,62	4,56	4,53	4,50	4,46	4,43	4,40	4,36		
6	5,99	5,14	4,76	4,53	4,39	4,28	4,21	4,15	4,10	4,06	4,00	3,94	3,87	3,84	3,81	3,77	3,74	3,70	3,67		
7	5,59	4,74	4,35	4,12	3,97	3,87	3,79	3,73	3,68	3,64	3,57	3,51	3,44	3,41	3,38	3,34	3,30	3,27	3,23		
8	5,32	4,46	4,07	3,84	3,69	3,58	3,50	3,44	3,39	3,35	3,28	3,22	3,15	3,12	3,08	3,04	3,01	2,97	2,93		
9	5,12	4,26	3,86	3,63	3,48	3,37	3,29	3,23	3,18	3,14	3,07	3,01	2,94	2,90	2,86	2,83	2,79	2,75	2,71		
10	4,96	4,10	3,71	3,48	3,33	3,22	3,14	3,07	3,02	2,98	2,91	2,85	2,77	2,74	2,70	2,66	2,62	2,58	2,54		
11	4,84	3,98	3,59	3,36	3,20	3,09	3,01	2,95	2,90	2,85	2,79	2,72	2,65	2,61	2,57	2,53	2,49	2,45	2,40		
12	4,75	3,89	3,49	3,26	3,11	3,00	2,91	2,85	2,80	2,75	2,69	2,62	2,54	2,51	2,47	2,43	2,38	2,34	2,30		
13	4,67	3,81	3,41	3,18	3,03	2,92	2,83	2,77	2,71	2,67	2,60	2,53	2,46	2,42	2,38	2,34	2,27	2,23	2,18		
14	4,60	3,74	3,34	3,11	2,96	2,85	2,76	2,70	2,65	2,60	2,53	2,46	2,39	2,35	2,31	2,27	2,22	2,18	2,13		
15	4,54	3,68	3,28	3,06	2,90	2,79	2,71	2,64	2,59	2,54	2,48	2,40	2,33	2,29	2,25	2,20	2,15	2,10	2,06		
16	4,49	3,63	3,24	3,01	2,85	2,74	2,66	2,59	2,54	2,49	2,42	2,35	2,28	2,24	2,20	2,15	2,10	2,06	2,01		
17	4,45	3,59	3,20	2,96	2,81	2,70	2,61	2,55	2,49	2,45	2,38	2,31	2,23	2,19	2,15	2,10	2,05	2,00	1,96		
18	4,41	3,55	3,16	2,93	2,77	2,66	2,58	2,51	2,46	2,41	2,34	2,27	2,19	2,15	2,11	2,06	2,01	1,96	1,92		
19	4,38	3,52	3,13	2,90	2,74	2,63	2,54	2,48	2,42	2,38	2,31	2,23	2,16	2,11	2,07	2,03	1,98	1,93	1,88		
20	4,35	3,49	3,10	2,87	2,71	2,60	2,51	2,45	2,39	2,35	2,28	2,20	2,12	2,08	2,04	2,00	1,95	1,90	1,84		
21	4,32	3,47	3,07	2,84	2,68	2,57	2,49	2,42	2,37	2,32	2,25	2,18	2,10	2,05	2,01	1,96	1,92	1,87	1,81		
22	4,30	3,44	3,05	2,82	2,66	2,55	2,46	2,40	2,34	2,30	2,23	2,15	2,07	2,03	1,98	1,94	1,89	1,84	1,78		
23	4,28	3,42	3,03	2,80	2,64	2,53	2,44	2,37	2,32	2,27	2,20	2,13	2,05	2,01	1,96	1,91	1,86	1,81	1,76		
24	4,26	3,40	3,01	2,78	2,62	2,51	2,42	2,36	2,30	2,25	2,18	2,11	2,03	1,98	1,94	1,89	1,84	1,79	1,73		
25	4,24	3,39	2,99	2,76	2,60	2,49	2,40	2,34	2,28	2,24	2,16	2,09	2,01	1,96	1,92	1,87	1,82	1,77	1,71		
26	4,23	3,37	2,98	2,74	2,59	2,47	2,39	2,32	2,27	2,22	2,15	2,07	1,99	1,95	1,90	1,85	1,80	1,75	1,69		
27	4,21	3,35	2,96	2,73	2,57	2,46	2,37	2,31	2,25	2,20	2,13	2,04	1,96	1,91	1,87	1,82	1,77	1,71	1,65		
28	4,20	3,34	2,95	2,71	2,56	2,45	2,36	2,29	2,24	2,19	2,12	2,04	1,96	1,91	1,87	1,82	1,77	1,71	1,65		
29	4,18	3,33	2,93	2,70	2,55	2,43	2,35	2,28	2,22	2,18	2,10	2,03	1,94	1,89	1,85	1,81	1,75	1,70	1,64		
30	4,17	3,32	2,92	2,69	2,53	2,42	2,33	2,27	2,21	2,16	2,09	2,01	1,93	1,88	1,84	1,79	1,74	1,68	1,62		
40	4,08	3,23	2,84	2,61	2,45	2,34	2,25	2,18	2,12	2,08	2,00	1,92	1,84	1,79	1,74	1,69	1,64	1,58	1,51		
60	4,00	3,15	2,76	2,53	2,37	2,25	2,17	2,10	2,04	1,99	1,90	1,84	1,75	1,70	1,65	1,59	1,53	1,47	1,39		
120	3,92	3,07	2,68	2,45	2,29	2,17	2,09	2,02	1,96	1,91	1,83	1,75	1,66	1,61	1,55	1,50	1,43	1,35	1,25		
∞	3,84	3,00	2,60	2,37	2,21	2,10	2,01	1,94	1,88	1,83	1,75	1,67	1,57	1,52	1,46	1,39	1,32	1,22	1,00		

Graus de liberdade para o denominador (v_2)