

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS TERMOPLÁSTICOS: PROJETO DE DISPOSITIVO E
METODOLOGIA DE ENSAIO PARA TESTE ARCAN MODIFICADO

por

Cármem Elis Birk Heckler

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, novembro de 2016.

CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS TERMOPLÁSTICOS: PROJETO DE DISPOSITIVO E
METODOLOGIA DE ENSAIO PARA TESTE ARCAN MODIFICADO

por

Cármem Elis Birk Heckler

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Alcy Rodolfo dos Santos Carrara
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Mecânica dos Sólidos**

Orientador: Prof. Jakson Vassoler Manfredini

Comissão de Avaliação:

Prof. Edson Hikaro Aseka

Prof. Letícia F. F. Miguel

Prof. Rodrigo Rossi

Porto Alegre, 16 de novembro de 2016.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família de sangue, especialmente meu pai, Nabor, minha mãe, Lourdes, e meus irmãos, Cleiton e Cledivan. Por sempre estarem comigo em pensamento, me apoiarem acima de tudo e todos, e por acreditarem em mim até quando eu não acreditei.

Agradeço à minha família da CÉU, por me fazerem sentir em casa, mesmo tão longe das raízes. Pelo companheirismo, amizade e longas conversas. Por mostrarem que sempre tem lugar pra mais um.

Agradeço a todos meus amigos, os de longe e os de perto. Pelo apoio, companheirismo e carinho.

Agradeço ao professor e orientador Jakson, pela orientação e auxílio prestados.

HECKLER, C. E. B. **Caracterização de materiais termoplásticos: Projeto de dispositivo e metodologia de ensaio para teste Arcan modificado**. 2016. 19 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

RESUMO

Conhecer a resposta mecânica de materiais frente a diferentes esforços é de fundamental importância no projeto e desenvolvimento de componentes mecânicos, principalmente quando este material possui comportamento não linear e dissipativo. Os materiais termoplásticos são de grande interesse na indústria devido a sua facilidade de fabricação, porém encontram barreiras técnicas em aplicações que possuem comprometimento estrutural, uma vez que são difíceis de caracterizar numericamente e experimentalmente. O principal problema é oriundo da grande variabilidade na resposta mecânica que este pode apresentar, segundo a técnica de fabricação escolhida para o componente mecânico. Por ter um comportamento completamente diferente de materiais metálicos, devido a sua organização interna, os materiais termoplásticos necessitam de técnicas experimentais adequadas para fornecer respostas úteis na sua caracterização mecânica, como curvas de força-deslocamento ou tensão-deformação. Assim, este trabalho apresenta um estudo de técnicas de ensaio capazes de obter dados para caracterizar experimentalmente materiais, e então propõe um único dispositivo capaz de realizar diferentes esforços internos e obter respostas mecânicas úteis para sua caracterização. Para isto um dispositivo, baseado no teste Arcan, é proposto especificamente para materiais termoplásticos. Juntamente com tal dispositivo, geometrias dos corpos de prova também são definidas para dois procedimentos experimentais. Com este trabalho, chega-se a um protótipo do dispositivo capaz de obter respostas mecânicas de força e deslocamento úteis para caracterização de materiais termoplásticos. Por fim, é apresentado um estudo numérico da possibilidade do uso de valores médios para tensão uniaxial e cisalhante pura nos corpos de prova propostos.

PALAVRAS-CHAVE: caracterização mecânica; teste Arcan, termoplásticos.

HECKLER, C. E. B. **Thermoplastic materials characterization: device project and experimental methodology of a modified Arcan test**. 2016. 19 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

ABSTRACT

Knowing the mechanical response of materials to different stresses has fundamental significance in the project and development of mechanical components, especially when this material has non-linear and dissipative behavior. The industry has large interest in thermoplastic materials, because of their ease of manufacturing. However, there are technical barriers in applications who have structural commitment, once that they are hard to numerical and experimentally characterize. The main problem becomes from the big variability in the mechanical response that it can present, according to the chosen manufacturing technique. Because of their behavior that is completely different from metallic materials, due to their internal organization, the thermoplastic materials need appropriate experimental techniques to provide useful responses in your mechanical characterization like load-displacement or stress-strain. Therefore, this work presents a study of techniques capable of obtaining data to experimentally characterize materials, and then propose one device capable of executing different internal stresses to obtain useful mechanical responses. For this, a device based on Arcan test was suggested specifically to thermoplastic materials. Along with this device, specimen geometries are determined for two experimental procedures. With this work, a prototype capable to obtain mechanical responses of load and displacement useful to thermoplastic materials characterization was achieved. Lastly, a numerical study of the possibility to use mean values of uniaxial and pure shear stress on the suggested specimens.

KEYWORDS: mechanical characterization, Arcan test, thermoplastics.

ÍNDICE

Pág.

RESUMO.....	iv
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	1
3. REVISÃO BIBLIOGRAFICA	2
3.1. POLÍMEROS.....	2
3.2. ENSAIOS MECÂNICOS	3
3.3. TESTE ARCAN.....	4
3.3.1. GEOMETRIAS DOS CORPOS DE PROVA	6
3.3.2. TIPOS DE FIXAÇÃO.....	6
3.3.3. USO DE TÉCNICA ÓPTICA.....	7
3.3.4. VERIFICAÇÃO DOS ESTADOS DE TENSÕES E DEFORMAÇÕES.....	7
4. PROPOSTA.....	8
4.1 DISPOSITIVO ARCAN.....	8
4.2 CORPO DE PROVA	9
4.3 FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	11
4.4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	11
4.5 VERIFICAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE DEFORMAÇÕES E TENSÕES	12
4.6. CURVAS TENSÃO-DEFORMAÇÃO.....	13
5. CONCLUSÕES	14
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	14
ANEXOS.....	16
ANEXO I – Principais dispositivos para teste Arcan da literatura.	16
ANEXO II - Principais corpos de prova para teste Arcan da literatura.	17
APÊNDICE	18
APÊNDICE I – Tensões médias na seção útil	18
APÊNCIDE II – Simplificação.....	19

1. INTRODUÇÃO

Materiais poliméricos são amplamente utilizados na indústria para fabricação de componentes estruturais. Seu baixo custo de produção, baixo peso, resistência à corrosão, capacidade isolante, baixa temperatura de processamento e reciclabilidade são algumas características que tornam este material tão utilizado. Porém, alguns detalhes dificultam seu uso. Materiais termoplásticos, principalmente, podem apresentar comportamento mecânico complexo do ponto de vista da caracterização mecânica, com resposta elástica não linear, sensibilidade à velocidade do carregamento e temperatura, deformações permanentes, anisotropia, entre outros fenômenos. Além disto, não menos importante, a resposta do componente é influenciada pelo método de fabricação, o que torna o procedimento de caracterização de extrema importância para utilização correta deste material em componentes com responsabilidade estrutural.

Existem diversos meios para caracterizar e avaliar o comportamento mecânico de materiais. Uma forma muito usada para isto são os ensaios mecânicos realizados segundo normas. Os ensaios mecânicos consolidados são os de tração uniaxial, compressão uniaxial, torção elástica e flexão, que são normatizados. Estes permitem obter alguns parâmetros de material, úteis apenas para modelos clássicos de elasticidade linear, como por exemplo módulos de elasticidade, cisalhamento, compressibilidade e o coeficiente de Poisson.

Porém, de forma mais geral, ensaios mecânicos quando escolhidos adequadamente, também permitem caracterizar os mais diversos materiais, frente a praticamente qualquer tipo de sollicitação e suas combinações, ou seja, não apenas para elasticidade linear. A partir de diferentes tipos de ensaios é possível levantar diferentes relações entre componentes de deformação e tensão, e conseqüentemente, caracterizar o material frente as suas respostas constitutivas (curvas) simultaneamente. Cada ensaio permite obter respostas úteis segundo as sollicitações praticadas, podendo-se melhorar a capacidade preditiva de um modelo constitutivo. Esta abordagem normalmente é usada para materiais que não possuem comportamento linear, como os materiais hiperelásticos, que em via de regra, necessitam de pelo menos três diferentes tipos de ensaios para sua caracterização. Para a realização de cada um destes ensaios são necessários acessórios específicos para fixar o corpo de prova e impor os carregamentos desejados ou a cinemática desejada. A geometria do corpo de prova também pode modificar significativamente segundo o ensaio. Um ensaio de cisalhamento requer um corpo de prova com geometria muito diferente de um ensaio de tração. O que impõe uma dificuldade adicional à caracterização de termoplásticos devido a sua variação de propriedades mecânicas segundo o processo de fabricação. Quando um componente de polímero é fabricado por injeção, este pode apresentar resposta mecânica diferente apenas devido a geometria final do componente, mesmo que se use a mesma composição.

Materiais que possuem comportamento não linear podem necessitar de estratégias de caracterização que levem em consideração mais de um tipo de sollicitação, devido às relações constitutivas existentes. Assim, é necessário a execução de vários tipos de ensaios com o mesmo material. Existe na literatura propostas de dispositivos para impor combinação de esforços a fim de se obter características mecânicas úteis na caracterização de materiais, principalmente para identificar falha. Porém, ainda não existe um único teste ou procedimento consolidado, necessitando de mais estudos sobre o tema.

2. OBJETIVOS

O principal objetivo deste trabalho é estudar metodologias de ensaio mecânicos e propor um único dispositivo capaz de fornecer informações para caracterização de materiais termoplásticos frente a diferentes sollicitações, levando em consideração a geometria do corpo de prova que pode influenciar na resposta mecânica do ensaio.

As informações de interesse deste trabalho são principalmente as de força e deslocamento, que podem ser associadas a técnicas modernas de caracterização para obtenção de curvas reais de tensão-deformação. Porém, neste estudo também verifica-se,

através uma análise numérica, o uso de simplificações (tensão média) na estimativa de tensões na seção do corpo de prova e os limites de aplicação do dispositivo.

Com este dispositivo espera-se avaliar o comportamento mecânico frente a solicitações de tração e/ou cisalhamento e combinações de tração e cisalhamento simultaneamente. Ensaio e testes piloto do protótipo serão realizados em trabalhos futuros.

3. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

3.1.POLÍMEROS

Os polímeros atualmente são usados em várias aplicações na indústria, inclusive em algumas aplicações de responsabilidade estrutural. Estes são formados por macromoléculas constituídas por unidades repetidas chamadas monômeros. O tamanho da cadeia polimérica é diretamente proporcional à massa molar, afetando diretamente as propriedades dos polímeros. Porém, o mesmo polímero não possui, necessariamente, o mesmo comprimento de cadeia, especificando-se uma massa molar média.

Estruturalmente, os polímeros podem se organizar de forma lineares, ramificados, com ligações cruzadas e em rede, além de possuírem várias configurações isoméricas [Callister e Rethwisch, 2007]. Termoplásticos, em sua maioria, tem estruturas lineares ou ramificadas com cadeias flexíveis, enquanto polímeros termofixos formam cadeias em rede, sendo rígidos, e não amolecendo sob aquecimento. Quanto à organização molecular, polímeros podem ser totalmente amorfos, ou possuírem certo grau de cristalinidade, tendo pequenas regiões cristalinas, os cristalitos, dispersas em material amorfo. Polímeros lineares cristalizam com mais facilidade, enquanto polímeros em rede são quase totalmente amorfos, devida à presença de ligações cruzadas [Callister e Rethwisch, 2007]. Esta organização interna é a principal responsável por conferir a resposta mecânica final destes materiais.

O processo de fabricação de um polímero também pode modificar as suas propriedades. A fabricação de materiais termoplásticos ocorre normalmente em temperaturas próximas ao ponto de fusão e, com frequência, com a aplicação de pressão. Os termoplásticos amorfos são conformados acima de sua temperatura de transição vítrea, ou, se forem semicristalinos, acima de suas temperaturas de fusão. Um benefício significativo de se usar termoplásticos é que eles podem ser reciclados. A moldagem é o método mais comum para a conformação de polímeros plásticos. As várias técnicas de moldagem usadas incluem as moldagens por compressão, transferência, sopro, injeção e extrusão [Callister e Rethwisch, 2007]

Devido ao seu comportamento não-linear, polímeros termoplásticos têm sido objeto de estudo de inúmeros trabalhos. Diversos modelos e metodologias são continuamente desenvolvidas a fim de se conhecer o comportamento mecânico em estados multiaxiais, porém, até o presente momento, nenhum método de ensaio conseguiu representar o comportamento de materiais termoplásticos de maneira completa e satisfatória.

A curva tensão-deformação nominal de polímeros, apresentada na Figura 3.1, pode se apresentar de 3 formas: comportamento frágil, com deformação permanente ou altamente elástico, típico da borracha.

Quando sujeito a grandes deformações, os termoplásticos, diferentemente dos metais que no limite de escoamento formam uma estrição que fica confinada na região do pescoço, formam uma estrição que prolonga ao longo do comprimento útil do corpo de prova. Isso acontece porque, ao ser tracionado, as cadeias poliméricas se reorientam, ficando alinhadas paralelamente à direção do alongamento e causando um aumento localizado da resistência. Com este aumento da resistência, o corpo se deforma nas vizinhanças menos resistentes, fazendo com que a estrição se propague.

Em polímeros termoplásticos pode ocorrer falha dúctil ou frágil. Fatores que favorecem a fratura frágil são a redução da temperatura, aumento da taxa de deformação, presença de um entalhe afilado, maior espessura da amostra e qualquer modificação na estrutura do polímero que aumente a temperatura de transição vítrea. As temperaturas de fusão e transição vítrea são parâmetros importantes relacionados às aplicações em serviço dos polímeros. Elas

definem, respectivamente, os limites de temperatura superior e inferior para numerosas aplicações, especialmente para os polímeros semicristalinos [Callister e Rethwisch, 2007].

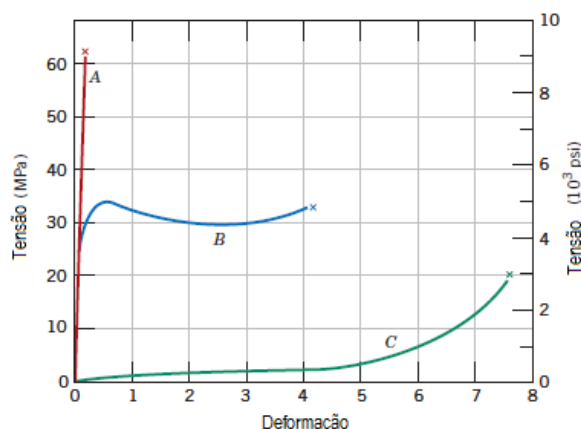


Figura 3.1: Relação tensão vs. deformação para polímeros frágeis (curva A), plásticos (curva B), e altamente elásticos (curva C) [Callister Callister e Rethwisch, 2007].

O processo de injeção é o mais utilizado devido a sua alta produtividade. Porém, o produto acabado tem variações na sua estrutura devido à quatro fatores, que são: temperatura do material, taxa de resfriamento, pressão no molde e velocidade de escoamento [Bianchezzi, 2014]. Devido a estes fatores, uma peça formada por apenas um tipo de termoplástico pode apresentar variações em sua estrutura, quando a geometria a ser injetada é variada.

O método de fabricação por usinagem, por exemplo, deve ser cuidadosamente parametrizado, pois o calor gerado na usinagem dos polímeros, especialmente, devido à sua baixa condutividade térmica, tende a se concentrar na zona de corte, aumentando a temperatura. Altas temperaturas aumentam a mobilidade das moléculas, modificando estruturalmente o material [Schneider et al, 2015].

No PVC extrudado o módulo de elasticidade varia de 1,06 a 4,83 GPa, e tensão de escoamento de 1,79MPa a 57,4Mpa [Matweb, 2016], que representam um dado com um desvio muito alto para ser considerado em um projeto. A maioria dos termoplástico possuem uma grande variação em suas propriedades. A rigor, cada componente fabricado deveria ser caracterizado posteriormente a sua fabricação, uma vez que não é possível garantir que para uma mudança geometrica, o material final terá a mesma resposta mecânica. Assim, seria necessário extrair os corpos de prova do componente, com os devidos cuidados, e ensaiá-los.

3.2. ENSAIOS MECÂNICOS

O ensaio de tração é o método mais empregado para a caracterização do material e para a extração da curva tensão-deformação, juntamente com várias propriedades importantes. Existem diversas normas para este ensaio. O ensaio consiste em submeter um corpo de prova, cilíndrico ou plano, a um esforço de tração uniaxial crescente até a sua ruptura [Garcia et al., 2000].

No ensaio de compressão, aplicam-se cargas uniaxiais compressivas a um corpo de prova cilíndrico. Neste ensaio também é gerada uma curva tensão-deformação, porém, enquanto ensaios de tração são empregados mais comumente para materiais dúcteis, este ensaio é mais comum para materiais frágeis [Garcia et al., 2000].

O ensaio de torção consiste em aplicar uma carga rotativa em um corpo de prova, geralmente de geometria cilíndrica. Mede-se o ângulo em função do momento torsor aplicado. Neste ensaio, obtém-se a curva de momento de torção x ângulo de torção. Dentre as principais características mecânicas extraídas estão o limite de escoamento à torção, o módulo de ruptura à torção e o módulo de elasticidade transversal. Admite-se que a tensão de cisalhamento na seção transversal da barra varie linearmente com o raio, sendo o valor

máximo da tensão na superfície e o valor mínimo (igual a zero) no centro. Para minimizar este gradiente de tensões que pode levar a resultados errôneos nos testes, é mais apropriado utilizar-se corpos de prova tubulares [Garcia et al., 2000].

O ensaio de flexão pode ser de três ou quatro pontos, e consiste na aplicação de uma carga crescente em um corpo de prova apoiado em dois pontos. Mede-se o valor da carga *versus* a deformação máxima. Durante o ensaio, ocorrem esforços normais e tangenciais na seção transversal do corpo de prova, gerando um complexo estado de tensões em seu interior. Os principais resultados do ensaio são o módulo de ruptura na flexão, módulo de elasticidade, módulo de resiliência e módulo de tenacidade [Garcia et al., 2000].

Um ensaio que permite analisar estados multiaxiais e que vem sendo adaptado para os mais diversos materiais ao longo dos anos é o teste Arcan. Este dispositivo permite, através de diferentes configurações, realizar testes de tração, cisalhamento, ou diversas combinações de ambos. De um modo geral e simplificado, o dispositivo consiste em uma placa circular com dois recortes, em que se aplica uma carga de tração. Por ser um o ensaio que possui as características desejadas deste estudo, este será apresentado em maiores detalhes.

3.3. TESTE ARCAN

Arcan et al., 1978, originalmente desenvolveram o dispositivo para avaliar o comportamento de materiais compósitos reforçados com fibras, sob a ação de condições de cisalhamento puro ou combinações de cisalhamento e tração. O teste permitia obter o diagrama tensão-deformação, módulo de cisalhamento e tensões para falha por ruptura para condição de cisalhamento puro. Por causa do complexo estado de tensões, a falha ocorre, com frequência, fora da área de interesse. Para resolver este problema, é proposta a utilização de um dispositivo de material diferente do material de interesse e um corpo de prova acoplado no centro do dispositivo. Neste caso, as deformações cisalhantes são medidas com extensômetros e a tensão de cisalhamento é calculada como a força dividida pela área da seção entalhada. A seção de interesse do dispositivo, que pode ser vista na Figura 3.2, é a seção AB, e o corpo de prova é projetado de maneira que o estado de tensões em AB é o mais uniforme possível. As porções retilíneas dos recortes são orientadas a $\pm 45^\circ$ e, por isso, as tensões principais na vizinhança também são nessa direção. A uniformidade das tensões foram investigadas com métodos fotoelásticos por meio de corpos de prova feitos de policarbonato e resina acrílica, e com medidas com *strain gages* em corpos de prova de alumínio.

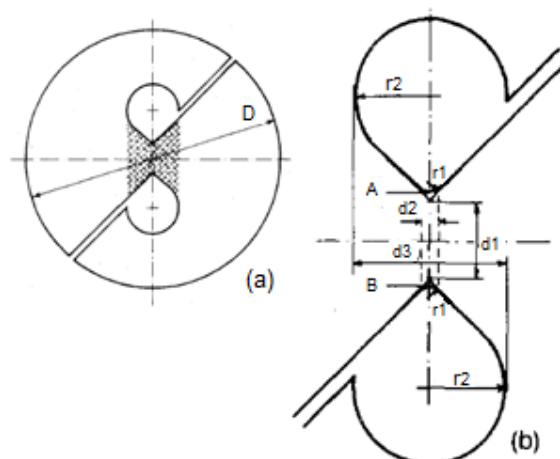


Figura 3.2: Dispositivo Arcan original(a): a área significativa do corpo de prova está hachurada; (b)dimensões do dispositivo [Arcan et al., 1978].

Originalmente, o dispositivo era uma peça do material a ser ensaiado, usinado na geometria. O corpo de prova era, portanto, todo o dispositivo. Porém, levando em conta a dificuldade em cortar o formato completo do dispositivo em compósitos laminados, Arcan

desenvolveu um procedimento simplificado em que, do dispositivo original em alumínio, a parte central marcada na figura é substituída pelo material compósito. O corpo de prova era então colado ao alumínio com a ajuda de quatro guias de apoio [Arcan et al., 1978].

Medidas se provaram corretas não somente na configuração de cisalhamento puro, mas também para condições em que a razão entre tensões principais de tração e cisalhamento são alteradas, alterando-se o ângulo do carregamento com o eixo vertical [Arcan et al., 1978; Chatterjee et al., 1993].

Oliveira et al., 2004, adaptaram o teste Arcan para a identificação do comportamento ao cisalhamento da madeira Pinus. Determina, com o auxílio de simulação numérica, fatores de correção, considerando que o estado de tensões gerado não é totalmente homogêneo e puro. Os resultados obtidos são considerados adequados para o módulo de cisalhamento, porém o ensaio não obtém diretamente a resistência ao cisalhamento. O corpo de prova é fixo no dispositivo por meio de placas de agarre, guiadas por parafusos. O dispositivo, feito em alumínio, é ligado à máquina de testes por meio de pinos para reduzir efeitos indesejáveis de forças fora do plano e momentos.

Liu et al., 1996, também modifica o teste Arcan originalmente proposto para ensaiar madeira. O método é usado para avaliar o módulo de cisalhamento. O novo método só pode proporcionar resistência ao cisalhamento na direção das fibras. O dispositivo é adaptado para um corpo de prova com metade do tamanho original.

Kai et al., 2011, usam um dispositivo Arcan modificado para obter o módulo de cisalhamento e a curva principal do módulo de relaxação ao cisalhamento para um propelente sólido de foguetes (material viscoelástico).

Taher et al., 2012, modifica a estrutura para caracterizar as propriedades mecânicas de uma espuma polimérica de PVC, quanto à tração, compressão, cisalhamento e propriedades mecânicas bidirecionais. Isso é feito com uma distribuição quase espiral de furos. O dispositivo modificado fornece uma fixação em formato de S que consiste em dois braços em formato de bumerangue. O corpo de prova é ligado a duas placas, que são então mecanicamente fixadas aos braços, portanto posicionando o corpo de prova no centro do dispositivo. Usa dois tipos de corpo de prova. Um para obter a curva tensão de cisalhamento *versus* deformação de cisalhamento corrigida por meio de DIC (*Digital Image Correlation*) na condição de cisalhamento puro, e outro para ensaio de tração.

Braham et al., 2010, modifica a estrutura do dispositivo Arcan para analisar os modos mistos de fratura do concreto, onde analisa diversas combinações dos modos I e II de fratura. Braham também faz o levantamento das curvas de carga x deslocamento instrumentando o dispositivo com LVDT.

Yen et al., 1988, também modifica o dispositivo Arcan para obter as propriedades mecânicas de diversos materiais compósitos, onde se obteve o módulo de cisalhamento, resistência ao cisalhamento, e a superfície de fratura foram analisados.

Cognard et al., 2011, desenvolvem um dispositivo Arcan para estudar o comportamento de adesivos e estruturas compósitas que utilizam adesivos tratados como filmes finos. O dispositivo permite ser carregado sob compressão. Sua principal preocupação é desenvolver um dispositivo que elimine as singularidades do efeito de borda, que é resolvido usinando um 'bico' na borda do corpo de prova. O dispositivo desenvolvido permite a caracterização do comportamento não-linear do adesivo frente a diversos carregamentos, simulando as condições encontradas em ambientes de trabalho. Dentre as condições estudadas, analisou-se o comportamento de fratura sob tração/compressão e cisalhamento, e fluência e relaxação do material.

Adkins et al., 2011, desenvolveram um dispositivo Arcan para avaliar o comportamento da lâmina interna de pneus sob condições de temperatura extrema (-40°C). Também é estimada a vida usando um modelo paramétrico de fluência e documenta os mecanismos de falha do mesmo.

Por fim, Gruber et al., 2011, estuda as características de uma chapa de aço laminada à frio, de baixa resistência, endurecida, por meio de um dispositivo Arcan com corpo de prova desenvolvido para testes de fratura em regime de baixa tensão tri-axial. Ele também levanta a

curva força x deslocamento do teste. As figuras dos principais dispositivos citados podem ser vistas no anexo I.

O ensaio Arcan permite caracterizar com sucesso corpos de prova sob cisalhamento puro. Porém, para analisar estados planos de tensões, onde se combinam cisalhamento e tração, não é possível fazer um levantamento direto da curva real de tensão-deformação, pois a princípio o mecanismo de deformação real na seção útil do corpo de prova não pode ser totalmente previsto com estratégia de medição tradicional. Porém, tal estimativa poderia ser feita associando estratégias numéricas e medições óticas.

3.3.1. GEOMETRIAS DOS CORPOS DE PROVA

Outro quesito em que os dispositivos modificados se diferenciam são quanto à geometria dos corpos de prova e o modo como são presos ao dispositivo. Muitos corpos de prova têm formato borboleta, como os utilizados por Oliveira et al., 2004, Yen et al., 1988, e Liu et al., 1996, se diferenciando pelo modo de fixação ao dispositivo, que pode ser por agarre, parafusos ou guias, e pelo material ensaiado.

Taher et al., 2012, utiliza dois tipos de corpos de prova. Um corpo de prova para ensaio de tração e outro para ensaio de cisalhamento, de formato tipo borboleta feito de espuma polimérica. Os corpos de prova são usinados e posteriormente colados à placas de alumínio por meio de adesivo epóxi. Outra característica que diferencia este corpo de prova é que ele possui 15mm de espessura. O mesmo também faz uma análise quanto ao raio do entalhe dos corpos de prova tipo borboleta. Ele usa um raio de 6,67mm, que é o padrão adotado por Arcan em escala, e raios de 4,5 e 2,5mm para investigar o efeito do raio do entalhe na vizinhança. Segundo testes, para diferentes raios de entalhe, a trinca de ruptura do material inicia em diferentes locais na vizinhança, sendo que, quanto menor o raio, mais perto da seção de interesse a trinca se inicia. A tensão de cisalhamento média atinge um platô ao se diminuir o raio, sendo utilizado o raio de 2.5mm para seus testes.

Dois dispositivos que apresentam a geometria do corpo de prova bem diferenciados são os trabalhos de Braham et al., 2010, e de Cognard et al., 2010. Braham et al., 2010, apresenta uma geometria para o concreto, e Cognard et al., 2011 para adesivos compósitos e sua interação com metais e compósitos. Este, foca em desenvolver um corpo de prova que minimize as singularidades causadas pelos efeitos de borda. O corpo de prova possui seção retangular (seção 70 x 10mm), com um bico de 45° e raio de curvatura de 0,8mm.

Adkins et al., 2011, usou um corpo de prova de formato retangular, de modo a otimizar o agarre do dispositivo ao corpo de prova. Ele encontrou dois problemas ao testar a lâmina: (1) o agarre alterava a curvatura do corpo de prova, tirando o realismo do teste, e (2) observou-se um efeito Poisson grande devido à maciez do material, causando deslizamento devido à redução da espessura do corpo de prova. Ambos problemas foram resolvidos (encerrando) as pontas dos corpos de prova em epóxi. O corpo de prova de seção retangular possui as dimensões de 38 x 135mm, onde usa-se para fixação duas áreas de 38mm² de cada lado do corpo de prova. As figuras dos principais corpos de prova citados podem ser vistas no anexo II.

3.3.2. TIPOS DE FIXAÇÃO

Um efeito indesejado provém do modo com que o dispositivo é fixado na máquina de ensaios universal [Greer, 2011]. Tipicamente existem dois modos de fixação: (1) uma conexão por pinos que permite rotação no plano do corpo de prova, eliminando qualquer carregamento lateral no atuador e (2) uma conexão fixa que inibe a rotação no plano nas extremidades do dispositivo, que pode impor um carregamento lateral na estrutura atuadora de carga.

A Figura 3.3 representa as principais cargas atuantes em um dispositivo Arcan. Os pontos C e D representam a ligação entre corpo de prova e dispositivo e são tratadas como juntas rígidas. Se o ponto B é tratado como uma junta pinada, aplicando uma carga, no ponto

A, não produz um carregamento lateral. Entretanto, se a junta B é tratada como uma conexão rígida, carregamentos laterais (flexão) são desenvolvidas, e reagem no atuador.

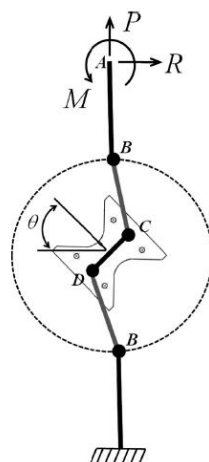


Figura 3.3: Forças atuantes no dispositivo Arcan [Greer, 2011].

Para o corpo de prova padrão com fixação por meio de 3 furos, a análise em elementos finitos mostra que o carregamento resultante no corpo de prova não é alinhado com o eixo de carregamento da máquina, ao invés disso está inclinado. O máximo de inclinação do carregamento visto foram nos resultados próximos a 30° e podiam variar até 5° ao longo do comprimento de trinca analisado. Testes usando DIC (*Digital Image Correlation*) confirmaram um movimento lateral no atuador na montagem com múltiplos pinos para o caso do corpo de prova a 60° . Esses carregamentos laterais devem ser contados no caso de projeto de experimentos para certificar que os limites da estrutura do atuador não sejam excedidos, o que pode ocasionar um componente de modo III na intensidade da tensão de falha.

3.3.3. USO DE TÉCNICA ÓPTICA

Vários autores [Adkins et al., 2011], [Gruben et al., 2011], [Taher et al., 2012], utilizam o método de correlação de imagem (DIC) para obter o campo de tensão na área útil do corpo de prova. Essencialmente, DIC rastreia o deslocamento de uma escala cinza padrão aleatória, normalmente alcançado usando uma tinta spray cinza/branca/preta. Imagens são tiradas enquanto o corpo de prova deforma. Cada imagem é dividida em subgrupos e um algoritmo de correlação é usado para combinar o padrão aleatório enquanto o corpo de prova deforma. O vetor de deslocamento de cada ponto de interesse é obtido. Tal informação pode ser usada para se estimar deformações ou para usar em estratégias numérico-experimentais como o FEMU.

3.3.4. VERIFICAÇÃO DOS ESTADOS DE TENSÕES E DEFORMAÇÕES

Embora os estados de tensão e de deformação produzidos pelo dispositivo em alguns casos sejam aproximadamente homogêneos, eles não o são de forma exata. Para avaliar esses pequenos desvios, utiliza-se frequentemente simulação numérica pelo método dos elementos finitos. [Oliveira et al., 2004], encontra fatores de correção para obter-se o módulo de cisalhamento do material a partir do método de elementos finitos. [Kai et al., 2011], utilizam o FEM para comprovar a homogeneidade das tensões e deformações e para comprovar a viabilidade do método. [Taher et al., 2012], utiliza o método dos elementos finitos para corrigir as tensões superficiais medidas usando DIC, também para compreensão do estado não homogêneo de tensão na seção útil do corpo de prova de espuma. [Cognard et al., 2011], faz uso do método dos elementos finitos para analisar a distribuição de tensões através da espessura de adesivos e materiais compósitos, considerando especialmente os efeitos de

borda, otimizando o dispositivo. Tais verificações se fazem necessárias para obtenção das curvas de tensão-deformação.

4. PROPOSTA

4.1 DISPOSITIVO ARCAN

O formato circular do dispositivo é utilizado na maioria das propostas encontradas em literatura, e é mantida devido a sua fácil fabricação e possibilidade de aplicação de diferentes esforços. O material escolhido para fabricar o dispositivo é o aço inoxidável 304, devido a sua disponibilidade, e porque possui as propriedades adequadas. As propriedades são apresentadas na Tabela 4.1 [Matweb, 2016]:

	Densidade [g/cm ³]	Módulo de elasticidade [GPa]	Tensão de escoamento [MPa]	Coefficiente de Poisson
Aço Inoxidável	8,00	193	215	0,29

Tabela 4.1: Propriedades do material utilizado no dispositivo.

O diâmetro externo escolhido foi de 160mm e a espessura de 3mm. Estas dimensões deixam o dispositivo compacto, rígido e com baixo peso. A rigidez do dispositivo é importante quando pretende-se garantir uma boa acuracidade dos deslocamentos observados frente aos prescritos. O peso também é um importante fator uma vez que pode exercer pré-tensões altas no material. O volume total do dispositivo é de 69cm³, implicando um peso de aproximadamente 550g. Este peso equivale a uma força de aproximadamente 5,3N que é aplicada no corpo de prova. Como é uma força pequena em relação às forças necessárias para gerar uma deformação grande, pode-se dizer que o peso do dispositivo não influencia no ensaio.

De modo a definir limites de aplicação é importante avaliar a capacidade do dispositivo, que é determinada a partir da força máxima aplicada no dispositivo que faz com que surjam solicitações próximas à tensão de escoamento do material. Utilizando a tensão de escoamento do material chega-se a uma carga máxima de 3kN, com um fator de segurança de 1,5.

Durante o ensaio, espera-se que o dispositivo se comporte como corpo rígido. Na Figura 4.1 pode-se observar a deformação total sofrida pelo dispositivo e de um corpo de prova de PVC de 3mm espessura, em que é aplicado um deslocamento prescrito de 10mm. A relação de deformação média entre um corpo de prova de PVC e o dispositivo é de aproximadamente 300, demonstrando que o dispositivo não sofre deformações consideráveis que venham a interferir nos resultados dos ensaios.

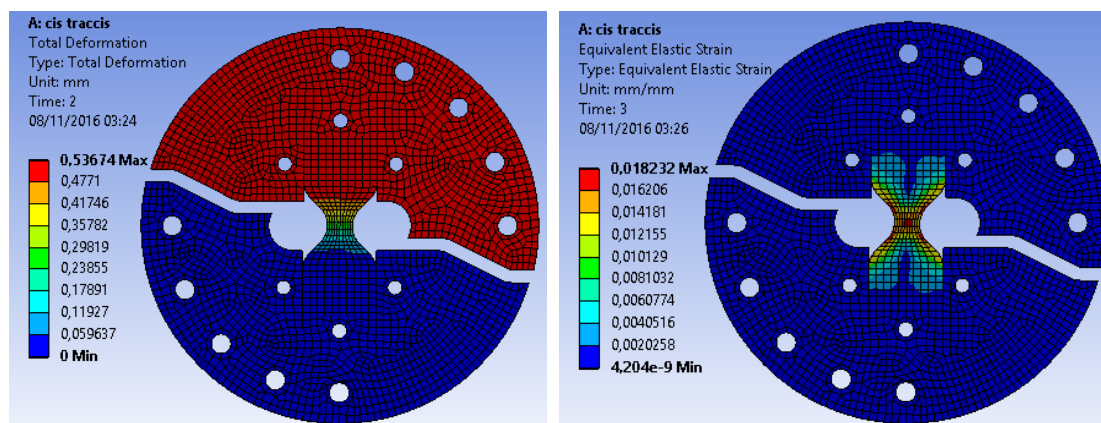


Figura 4.1: (a) Deformação Total; (b) Deformação elástica equivalente.

Quanto à fixação do dispositivo na máquina de testes, como apresentado anteriormente, existem vantagens e desvantagens para ambos os casos quando se trata de juntas fixas ou pinadas. Esperando-se obter um auto-alinhamento do dispositivo, optou-se pela fixação pinada. O aparato final desenvolvido neste trabalho é apresentado na Figura 4.2.

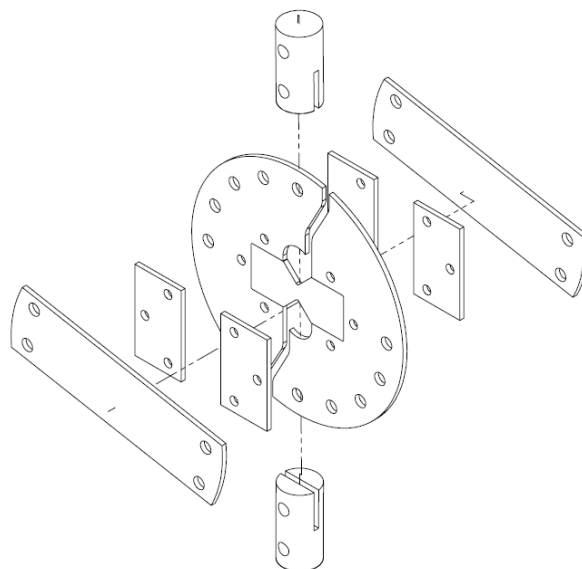


Figura 4.2 Aparato experimental [Elaborado pela autora].

4.2 CORPO DE PROVA

Visto que existe uma dificuldade intrínseca na fabricação de corpos de prova, que podem alterar as características mecânicas do material, e que se deseja que um único dispositivo sirva para caracterizar diferentes esforços, a proposta da geometria dos corpos de prova torna-se de grande importância neste trabalho. Assim, primeiramente é proposto o formato dos corpos de prova, e em seguida, as suas dimensões.

Devido a grande variedade de geometrias encontradas na literatura, que se diferenciam basicamente no tipo de entalhe, neste estudo decidiu-se propor duas alternativas de procedimentos experimentais.

A primeira proposta, apoiada em literatura, é concebida de forma a usar dois tipos de corpos de prova (Figura 4.3.a e Figura 4.3.b) para obter as respostas mecânicas dos diferentes esforços de interesse da caracterização. A rigor, estes seriam mais indicados, respectivamente, para ensaios de cisalhamento e tração separadamente. Porém, como utilizado em literatura, também poder-se-ia aplicar combinações de esforços, como será apresentado na proposta de procedimento de ensaios, apresentado posteriormente.

A segunda proposta, intuitivamente mais adequada, e a desejada, é usar apenas um corpo de prova com um entalhe alternativo. Neste caso, seria desejável que a geometria fosse suave e apresentasse uma distribuição de tensões e deformações uniformes ao longo da seção. Assim, propõe-se a geometria apresentada na Figura 4.3.c.

Vale ressaltar que este estudo de caracterização ainda é investigativo e por isto optou-se por não descartar nenhuma alternativa. Estas duas estratégias podem permitir entender com maior precisão a influência da geometria no tipo de ensaio realizado, e quão assertivo é usar um corpo de prova que seja adequado tanto para solicitações do tipo tração quanto do tipo cisalhamento, como vem sendo feito em literatura.

As dimensões foram baseadas em literatura. O corpo de prova para ensaio de tração (Figura 4.3.b), com seção útil mais alongada e sem entalhe, é baseado em os corpos de prova utilizados no ensaio de tração convencional em termoplásticos [ASTM D 638]. O corpo de prova mais adequado para teste de cisalhamento (Figura 4.3.a), é baseado na geometria do

corpo de prova da norma ASTM D 5379 (*Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method*). O entalhe é orientado a $\pm 45^\circ$ e, por isso, as tensões principais na vizinhança também são orientadas nesta direção, aproximando o estado de tensões ao longo da seção útil por um estado plano e uniforme de tensão [Arcan et al., 1978]. O raio de entalhe garante que o escoamento e a falha do material durante o ensaio inicie o mais próximo possível da área útil. Há, porém, uma preocupação que raios muito pequenos possam causar um efeito indesejado de concentrador significativo de tensão. Entretanto, estudos prévios encontrados na literatura [Taher et al., 2012] indicam que os raios pequenos não causam esse efeito e por isto foi adotado. O último corpo de prova, deve ser adequado para ensaios de tração e cisalhamento, é uma combinação de ambos os corpos de prova citados anteriormente. O raio do entalhe utilizado no corpo de prova para cisalhamento é baseado em Arcan et al., 1978, e tem valor de 1,42mm.

Para melhor comparação de resultados pelas duas estratégias, e para que todos possam ser usados no mesmo dispositivo, todos os corpos de prova têm a mesma dimensão externa de 30mm de largura e 70mm de comprimento, permitindo serem fixados da mesma forma no dispositivo. Além disto, também escolheu-se a mesma seção de área útil, com largura igual a 10mm, que é a menor dimensão usada na norma ASTM D638.

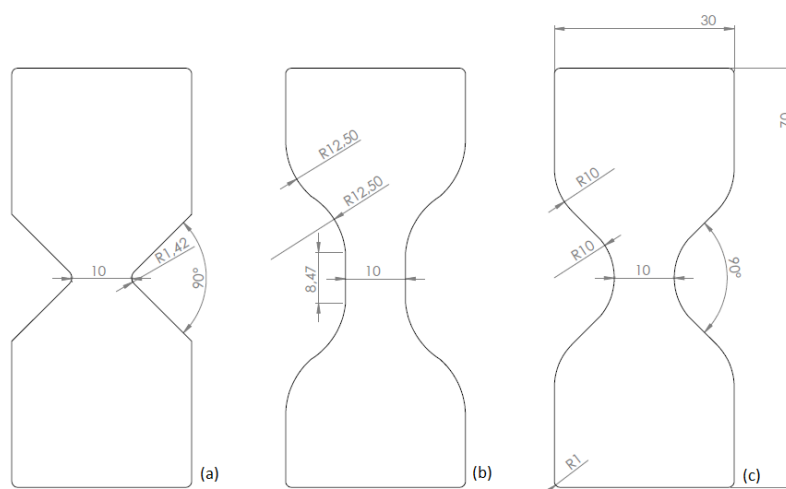


Figura 4.3: Corpos de prova propostos [Elaborado pela autora].

Quanto a espessura do corpo de prova, este não deve ser fino demais, de modo que ocorram esforços fora do plano, como por exemplo flambagem por flexo-torsão durante cisalhamento, ao invés dos esperados esforços puramente biaxiais. Assim, escolheu-se utilizar um corpo de prova com espessura de 2 a 3mm.

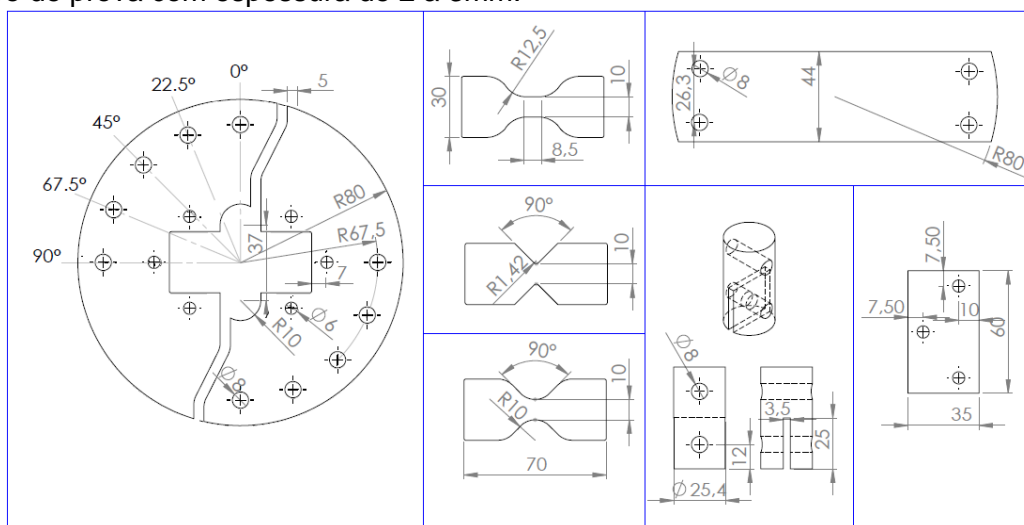


Figura 4.4: Dimensões do conjunto de ensaio [Elaborado pela autora].

Considerando os meios de fabricação do corpo de prova, e que, quaisquer interferências podem causar mudanças na estrutura, optou-se por não empregar uma fixação por meio de furos no corpo de prova, apesar de vários dispositivos apresentarem tal fixação. Julgou-se sendo o mais adequado para o material, fixação por meio de placas de agarre. Segundo a norma ASTM D638 para tração, é possível, caso seja necessário, usar uma lixa para melhor fixação por agarre, impedindo possíveis escorregamentos. As dimensões finais do conjunto podem ser vistas na Figura 4.4.

4.3. FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

O método de fabricação dos corpos de prova carece de atenção particular devido às características do material. Para fabricação dos corpos de prova o corte a *laser* não pode ser utilizado pois o aquecimento do polímero modificaria a estrutura molecular e o comportamento do material. No método de fabricação por injeção, também não se pode garantir mesma estrutura molecular para diferentes geometrias, não permitindo estudar as diferenças geométricas dos dois procedimentos. Assim, nesta primeira etapa este processo também foi desconsiderado.

O processo mais adequado para o estudo da influência da geometria do corpo de prova seria a obtenção a partir de uma mesma peça, como uma chapa, com facas de corte, que teria interferência mínima na estrutura molecular. Porém, devido a custos envolvidos na fabricação desta, a opção escolhida para fabricação dos corpos de prova foi a usinagem. Embora a operação de usinagem possa aquecer localmente o corpo de prova, modificando a estrutura, esta ainda é a opção mais viável. Efeitos indesejáveis podem ser minimizados utilizando-se parâmetros de corte adequados e fluido refrigerante durante a operação.

4.4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O procedimento experimental é baseado nas normas ASTM D638 – 02^a (*Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*) e ASTM D 5379 (*Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method*).

Para garantir uniformidade dos resultados, todos os corpos de prova devem ser preparados exatamente da mesma maneira. Deve-se também garantir uniformidade das condições do meio ambiente, e velocidade constante dos ensaios.

O ensaio deve ser realizado em uma máquina de ensaio estático, e deve satisfazer os seguintes requisitos: deve ter uma cabeça móvel e uma estacionária. Deve ser capaz de deslocar a cabeça móvel a velocidade controlada em relação à estacionária. O sensor de carga deve ser capaz de indicar a carga total aplicada no corpo de prova.

O número de corpos de provas por ensaio para ser considerado válido para materiais isotrópicos é de 5 corpos de provas.

A velocidade de ensaio deve ser a menor possível, que resulte ruptura do corpo de prova entre meio e cinco minutos de tempo de ensaio [ASTM D 638]. Em ensaios de materiais termoplásticos, a velocidade de ensaio é muito importante, pois para velocidades muito elevadas podem surgir efeitos indesejados de viscosidade, gerando erros. A norma de tração já contempla este efeito, portanto, para as velocidades escolhidas, este efeito não deve ocorrer. Recomenda-se uma velocidade de ensaio em torno de $0,0167\text{mm/s} \pm 25\%$ ($1\text{mm/min} \pm 25\%$). No caso de necessidade de mais pontos na região elástica, esta velocidade pode ser reduzida em uma ordem de grandeza, porém aumentaria consideravelmente o tempo total para ensaio de cada amostra.

Cada corpo de prova deve ter sua espessura medida em vários pontos ao longo do corpo de prova e sua média tirada. Com o dispositivo em uma superfície lisa e horizontal, o corpo de prova deve ser posicionado e fixado com as placas de fixação no dispositivo com auxílio dos parafusos de fixação do corpo de prova. Após fixo, mantendo o dispositivo sobre a superfície horizontal, deve-se posicionar as placas de segurança de cada lado do dispositivo, para que o corpo de prova não sofra deformações e solicitações ao fixar o dispositivo na

máquina de ensaios. O corpo de prova e as placas devem estar afixadas firmemente antes de mover o dispositivo, para que não haja movimento relativo entre os mesmos. Deve-se atentar também para que não se aplique carga excessiva na fixação, que possam resultar em solicitações residuais no corpo de prova. Com o corpo de prova fixo e seguro, fixa-se o dispositivo na máquina de ensaios, com auxílio dos adaptadores.

Medidas simultâneas de carga e deslocamento devem ser tomadas, e a partir destas, é possível plotar a curva força vs. deslocamento. Do ensaio, pode-se retirar valores de módulo de elasticidade, e força para ruptura do material. Para demais propriedades, é preciso utilizar técnicas mais avançadas que permitam captar deformações localizadas no corpo de prova, como por exemplo, correlação de imagem (DIC).

4.5 VERIFICAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE DEFORMAÇÕES E TENSÕES

Em alguns casos, onde pretende-se obter as curvas de tensão-deformação de alguns destes ensaios, é interessante verificar se as expressões comumente utilizadas no cálculo da tensão podem ser aproximadas pela tensão média (força medida/área útil da seção). Tais análises foram motivadas por artigos científicos [Arcan et al., 1978, Kai et al., 2011, Oliveira et al., 2004, Cognard et al., 2011] e visam verificar se é adequado realizar tais hipóteses simplificativas. Tal alternativa é testada apenas para a região elástica do material, considerando pequenas deformações.

Assim, o conjunto foi analisado por simulação numérica, via método dos elementos finitos, com auxílio do software Ansys. O método foi utilizado para avaliar as deformações sofridas pelo corpo de prova e dispositivo durante o ensaio e avaliar as distribuições de tensões ao longo do corpo de prova e da seção útil, onde fez-se um estudo da uniformidade das tensões.

Para padronizar o ensaio, deseja-se que seja possível obter todas as solicitações (tração, cisalhamento e combinações), por meio de um único corpo de prova. Para isso, foram comparados os esforços resultantes na área de seção útil do corpo de prova de cisalhamento e misto, que pode ser observado na Figura 4.5. A comparação para solicitações trativas podem ser vistas na figura 4.6.

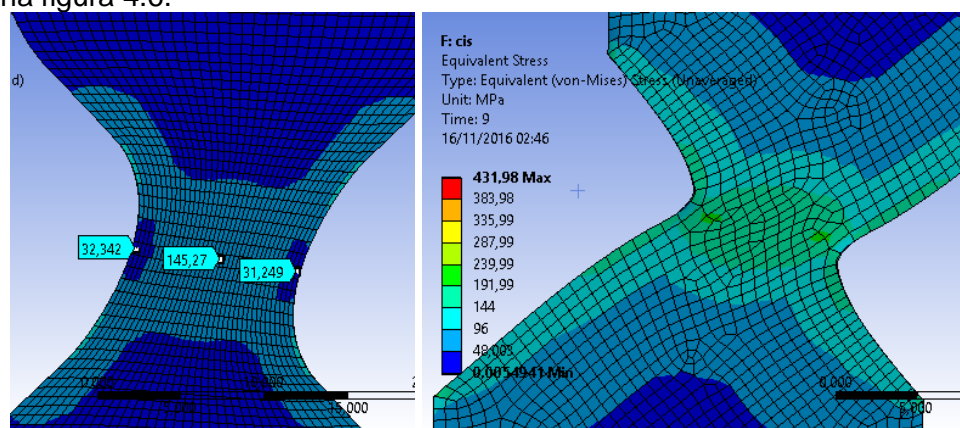


Figura 4.5: Tensões de von Mises no ensaio de cisalhamento para o corpo de prova (a)misto e (b) de cisalhamento.

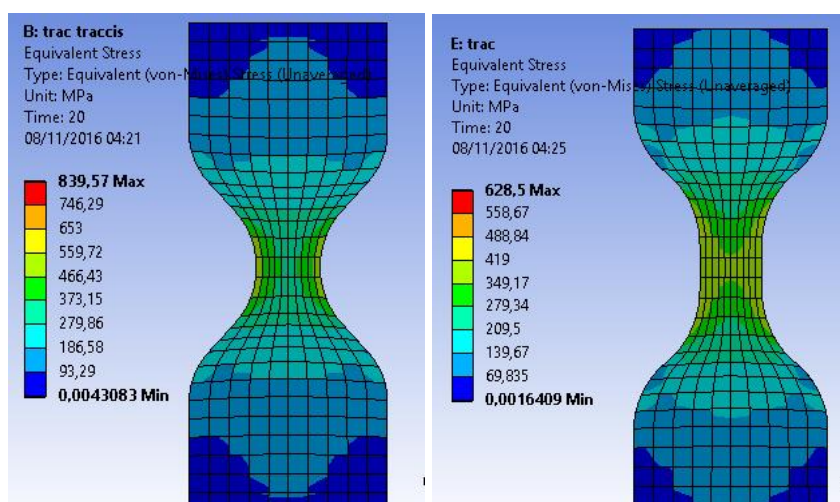


Figura 4.6: Tensões de von Mises no ensaio de tração para o corpo de prova (a)misto e (b) de tração.

Um meio de comprovar a validade do uso da tensão média no cálculo das tensões puramente cisalhantes ou trativas, é avaliar as solicitações ao longo da seção útil do corpo de prova, onde espera-se que, dentro da região de pequenos deslocamentos, sejam o mais uniforme possíveis. Pode-se observar distribuição das tensões ao longo da seção útil, e a linha de tensão média (força/área) no Apêndice I. Na região de pequenos deslocamentos, para os corpos de prova de cisalhamento e tração (Fig 4.3.a e fig 4.3.b, respectivamente), há pouca variação de tensão ao longo da seção útil, podendo-se considerar a tensão média para os cálculos. Porém, ao atingir a região de grandes deformações, solicitações consideráveis tendem a surgir fora da seção útil, invalidando a simplificação do cálculo de tensões.

O corpo de prova proposto para ensaios com esforços combinados (Fig 4.3.c) não pode ter suas componentes de tensão aproximadas pela tensão média. Este apenas fornece informações de força e deslocamento, que são úteis em estratégia de caracterização numérico-experimentais.

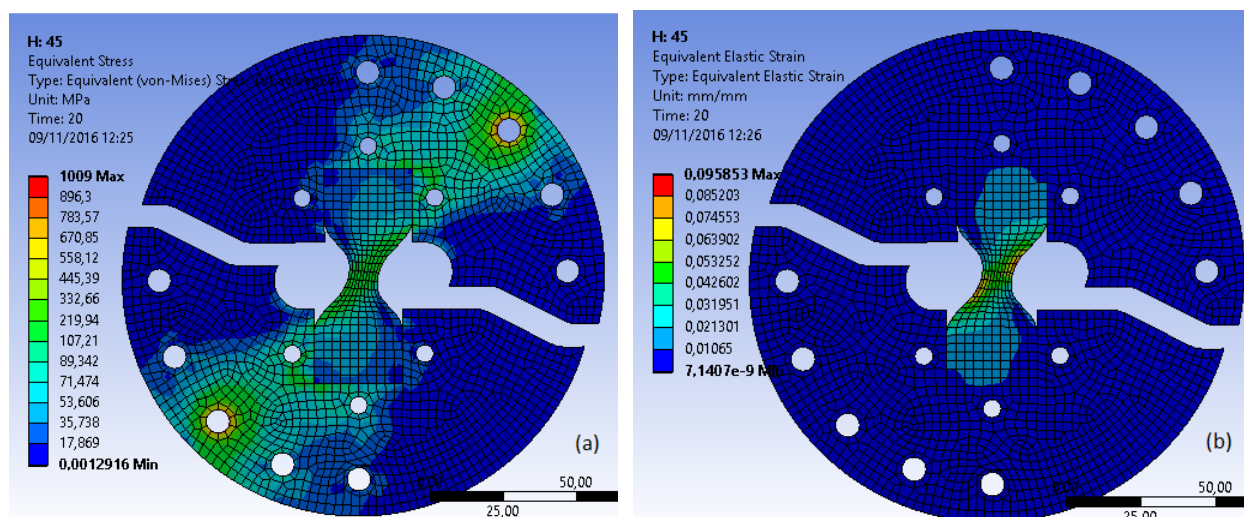


Figura 4.7: (a) Tensões e (b) deformações atuantes no ensaio de 45°.

4.6. CURVAS TENSÃO-DEFORMAÇÃO

A rigor, quando aplicado em combinações de esforços (22.5°, 45° ou 67.5°), este dispositivo não permite fazer uma relação direta das forças desenvolvidas com tensões,

através das tensões médias, principalmente em grandes deformações. Isto também se aplica ao estado de deformações. A única informação que o aparato é capaz de fornecer é a força resultante medida na célula de carga, para um dado deslocamento vertical aplicado pela máquina de ensaio. Estas informações podem ser usadas em estratégias de caracterização numérico-experimental, fazendo uso da técnica FEMU. Além disto, pode-se usar medidas de deslocamento localizados na estrição para fornecer mais informações úteis a este processo de identificação da curva real de tensão-deformação. Mais informações podem ser obtidas em [Bresolin, 2016].

5. CONCLUSÕES

Termoplásticos têm comportamento mecânico complexo e difícil de ser caracterizado mecanicamente. Sua correta e completa caracterização até hoje é um desafio para pesquisadores.

Através de um estudo de técnicas de ensaio, o presente trabalho propôs um aparato de ensaio capaz de fornecer respostas mecânicas frente a diversas solicitações. O dispositivo proposto foi baseado no teste Arcan, que possuía características pertinentes às necessidades.

Assim, foi proposta uma geometria para o dispositivo, bem como a técnica de fixação do dispositivo com a máquina e geometrias de corpos de prova para os ensaios. Com o aparato definido, foi proposto um procedimento experimental completo de forma a obter a resposta de força e deslocamento, baseado em procedimentos de normas. Os limites de aplicação do dispositivo e análise de rigidez também são apresentados.

Por fim, foi discutido e apresentado a possibilidade do uso de simplificações matemáticas no cálculo de tensões e deformações médias para obtenção de curvas de tensão-deformação e possibilidade do uso de técnicas modernas, como a técnica FEMU, que faz uso do método de elementos finitos na identificação da resposta constitutiva do material.

O dispositivo está sendo fabricado e será utilizado na caracterização de termoplásticos dentro do Grupo de Mecânica Aplicada (GMAp) da UFRGS.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Adkins, Jon-Michael, Prasun Majumdar, and Kenneth Reifsnider. "**Time Dependent (Creep) Deformation of Thin Elastomers at Cold Temperature and Effective Strain Analysis of Their Laminates.**" *Mechanics of Time-Dependent Materials and Processes in Conventional and Multifunctional Materials, Volume 3*. Springer New York, 2011. 193-206.

Arcan, M., Z. and Hashin, and A. Voloshin. "**A method to produce uniform plane-stress states with applications to fiber-reinforced materials.**" *Experimental mechanics* 18.4: 141-146, 1978.

ASTM D638 – 02a, "**Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics.**" 2003.

ASTM D 5379, "**Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method.**" 1999.

Biachezzi, V. "**Influência dos parâmetros de Injeção na Tensão Residual e sua Consequência no Comportamento Mecânico de Componentes Termoplásticos.**" Master's thesis, Universidade Federal de Santa Catarina, 2014.

Bresolin, F. L. "**Um estudo de diferentes modelos constitutivos para caracterização mecânica de materiais termoplásticos submetidos à deformações finitas.**" Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

Braham, A., F. Ni, and S. Yang. "An introduction of the Arcan testing configuration for mixed-mode cracking in asphalt concrete." *The 11th international conference on asphalt pavements (ISAP), Nagoya Aichi, Japan*. Vol. 2., 2010.

Callister, W. e Rethwisch, D. G. "Materials Science and Engineering: An Introduction". John Wiley & Sons, 7th edition, 2007.

Chaterjee, S., D. Adams, and D. W. Oplinger. *Test Methods for Composites A Status Report. Volume 3: Shear Test Methods*. MATERIALS SCIENCES CORP BLUE BELL PA, 1993.

Cognard, Jean-Yves, Laurent Sohier, and Peter Davies. "A modified Arcan test to analyze the behavior of composites and their assemblies under out-of-plane loadings." *Composites Part A: Applied science and manufacturing* 42.1 :111-121, 2011.

Garcia, A., Sprim, J. A., dos Santos, C. A. "Ensaios dos Materiais." LTC, 2000.

Greer, J. M., SE Galyon Dorman, and M. J. Hammond. "Some comments on the Arcan mixed-mode (I/II) test specimen." *Engineering Fracture Mechanics*78.9: 2088-2094, 2011.

Gruben, Gaute, et al. "Fracture characteristics of a cold-rolled dual-phase steel." *European Journal of Mechanics-A/Solids* 30.3: 204-218, 2011.

Kai, Deng, et al. "A new method to obtain shear modulus of solid propellant." *Acta Astronautica* 69.7: 440-444, 2011.

Liu, Jen Y., Robert J. Ross, and Douglas R. Rammer. "Improved Arcan shear test for wood." *International wood engineering conference*. 1996.

Matweb, "Overview of materials for PVC, Extruded", <http://www.matweb.com>. Acessado em 25/10/2016.

Matweb, "304 Stainless Steel", <http://www.matweb.com>. Acessado em 25/10/2016.

Oliveira, Marcelo, José Xavier, and José Morais. "Utilização do Ensaio de Arcan para a Identificação do Comportamento ao Corte da Madeira de Pinho." *1º Congresso Ibérico: a madeira na construção, Universidade de Minho, Guimarães*. 2004.

Schneider, Eduardo Luis, et al. "Análise dos Parâmetros de Usinagem no acabamento Superficial de Polímeros." *UNOPAR Científica Ciências Exatas e Tecnológicas* 7.1 (2015).

Taher, Siavash Talebi, et al. "Determination of mechanical properties of PVC foam using a modified Arcan fixture." *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 43.10: 1698-1708, 2012.

Yen, S. C., Craddock, J. N., Teh, K. T. "Evaluation of a Modified Arcan Fixture for the In-Plane Shear Test of Materials." *Experimental techniques* 12.12: 22-25, 1988.

ANEXOS

ANEXO I – Principais dispositivos para teste Arcan da literatura.

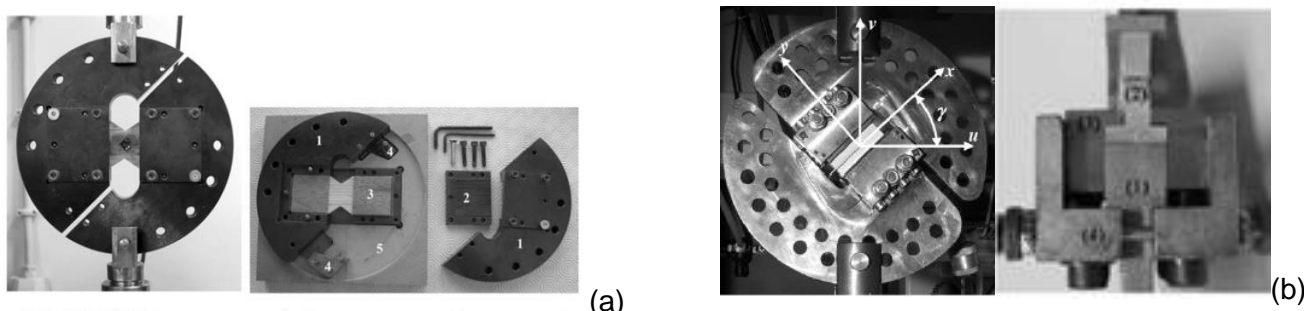


Figura A.1: (a) Dispositivo Arcan adaptado por Oliveira, 2004; (b) Dispositivo Arcan adaptado por Cognard, 2011.

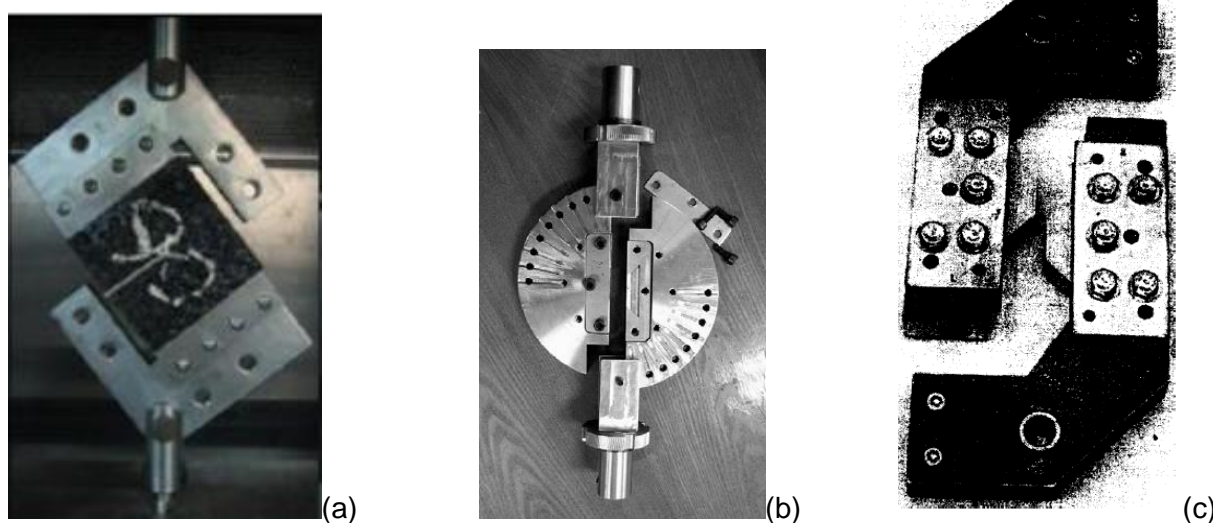


Figura A.2: (a) Dispositivo Arcan adaptado por Braham, 2010; (b) Dispositivo Arcan adaptado por Kai, 2011; (c) Dispositivo Arcan adaptado por Liu, 1996.

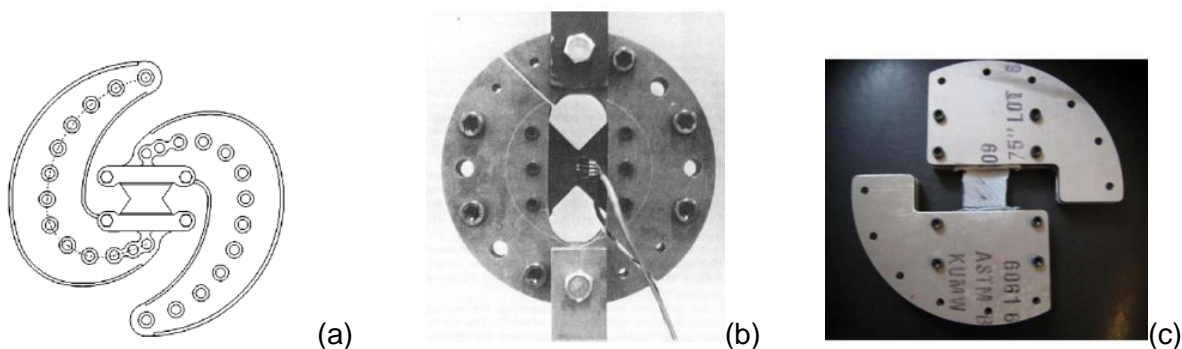


Figura A.3: (a) Dispositivo Arcan adaptado por Taher, 2012; (b) Dispositivo Arcan adaptado por Yen, 1988; (c) Dispositivo Arcan adaptado por Adkins, 2011.

ANEXO II - Principais corpos de prova para teste Arcan da literatura.

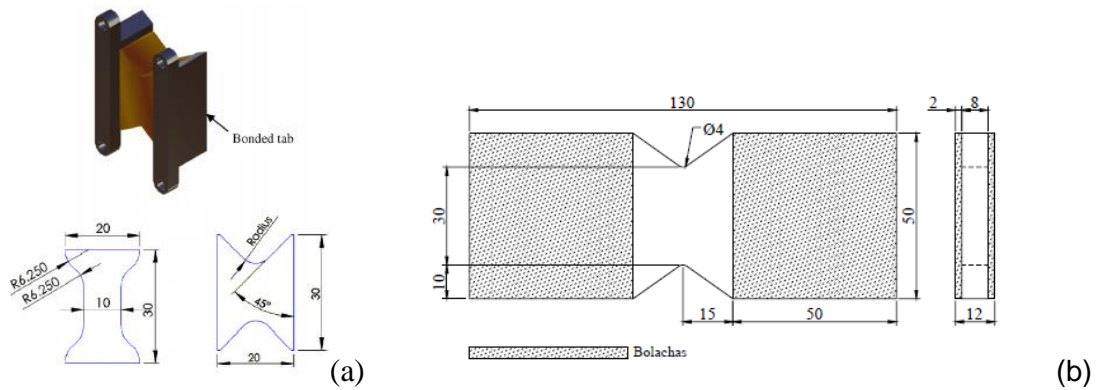


Figura A.4: (a)Corpo de prova usado por Taher,2012; (b)Corpo de prova usado por Oliveira,2004.

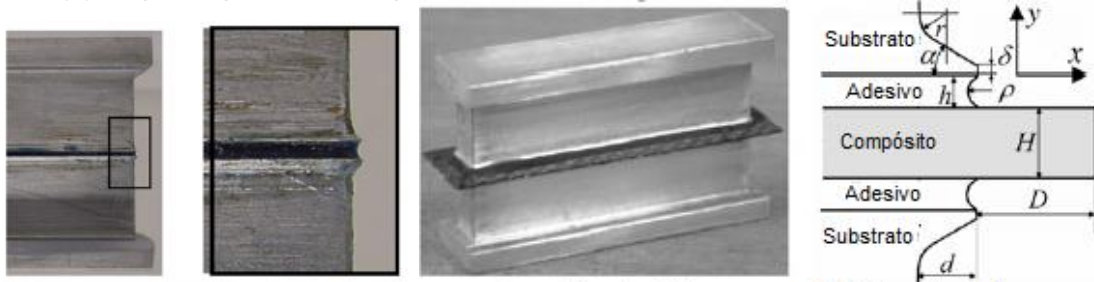


Figura A.5: Corpo de prova usado por Cognard, 2011.



Figura A.6: (a)Corpo de prova usado por Adkins,2011; (b) Fixação usada por Adkins,2011; (c)Corpo de prova usado por Yen, 1988.

APÊNDICE

APÊNDICE I – Tensões médias na seção útil

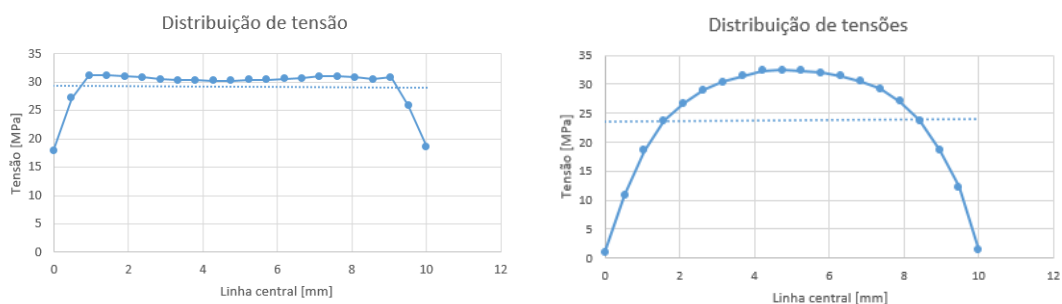


Figura A.7: Gráfico Tensão ao longo da seção útil do corpo de prova (a) de cisalhamento e (b) misto, para ensaio de cisalhamento em pequenos deslocamentos.

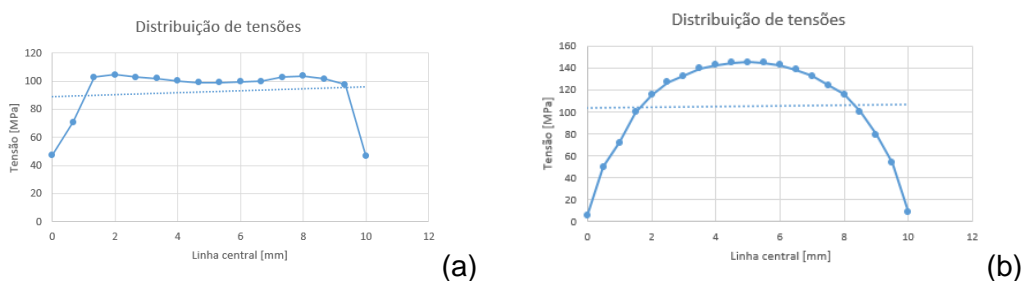


Figura A.8: Gráfico Tensão ao longo da seção útil do corpo de prova (a) de cisalhamento e (b) misto, para ensaio de cisalhamento em grandes deslocamentos.

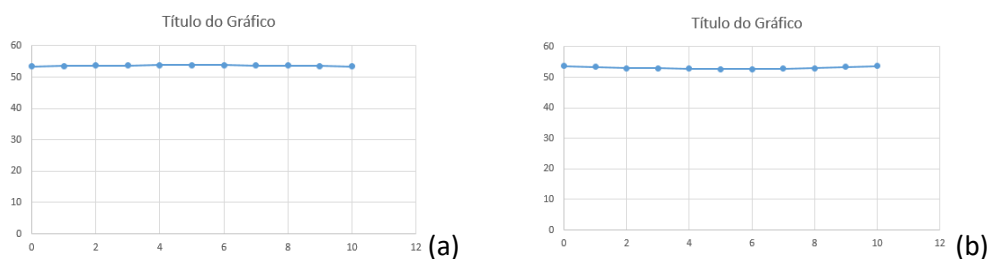


Figura A.9: Gráfico Tensão ao longo da seção útil do corpo de prova (a) de tração e (b) misto, para ensaio de tração em grandes deslocamentos.

APÊNCIDE II – Simplificação

Para reduzir tempo computacional, fez-se uma comparação dos esforços na seção útil, a fim de verificar a influência da fixação do corpo de prova no dispositivo, durante as simulações. Foram realizadas simulações comparando o corpo de prova preso pelas chapas de fixação, e na situação em que o corpo de prova é preso com “contato” ao dispositivo. Conforme pode ser visto na figura A.10, os resultados na seção útil mostram-se coerentes, podendo-se assim utilizar a simplificação proposta e reduzir tempo computacional.

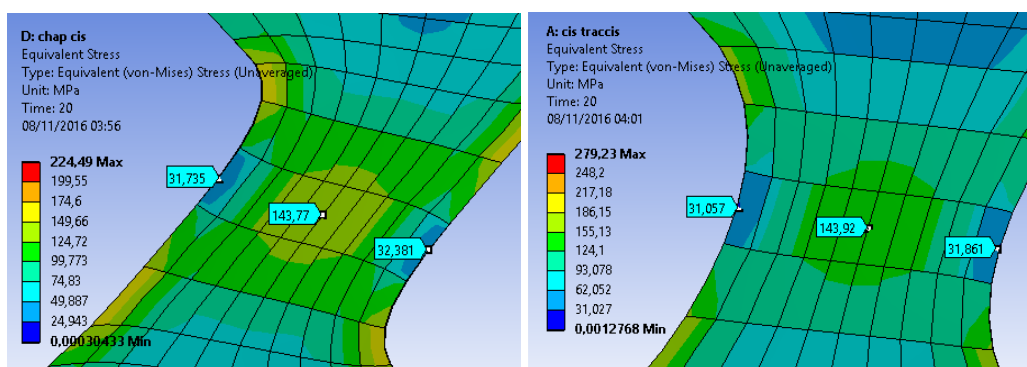


Figura A.10: (a) Solicitações no dispositivo com fixação; (b) Solicitações no dispositivo simplificado.