

Dissertação

Determinação da tenacidade de adesivos estruturais em modo II

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Realizado por :

Filipe Alberto da Cunha Rocha Gonçalves de Magalhães

Orientador :

Prof. Lucas F. M. da Silva

Co-orientador :

Eng. Filipe Chaves

Fevereiro 2010

Glossário

Acelerador – substancia que aumenta a velocidade de reacção de um sistema químico.

Aderente – materiais a ser ligados .

Adesão – atracção entre duas substancias resultante das forças intermoleculares que se estabelecem entre elas.

Adesivo – material polimérico capaz de juntar componentes.

Aditivo – substancia ou mistura de substancias acrescentadas em pequena proporção para aumentar ou modificar um ou varias propriedades dos materiais .

Agente de cura – substancia que inicia ou regulariza uma reacção de cura.

Agente de ligação – substancia capaz de promover ou acelerar uma ligação à interface da resina e do reforço.

Coesão - forças intermolecular dentro de uma substancia.

Cura – processo de conversão de uma composição polimérica ou pré-polimérica numa condição mais estável e utilizável por polimerização ou reticulação.

DCB – double cantilever beam

Desmoldante – substancia depositada no molde, destinada a facilitar a saída do produto moldado para fora do molde.

Endurecedor – agente de cura que inicia ou regulariza a reacção de cura das resinas, o que permite obter produtos rígidos.

ENF – End Notched Flexure

FPZ – *Fracture Process Zone*, a zona de processo de fractura é a região afectada pelo começo da fractura(microfissuração, macrodeformação plástica) no inicio da extremidade da fenda .

Interface – região de contacto entre a superfície de dois materiais.

Interfase – região entre o adesivo e o aderente.

Junta – conjunto formado pelos aderentes, o adesivo e todas as interfases associadas.

Molhagem – capacidade de um líquido se espalhar sobre superfície sólida.

Primário – substância que se utiliza por aplicação directa na superfície dos substratos com o objectivo de melhorar a adesão.

Pot – Life – tempo durante o qual uma resina, preparada para aplicação, permanece utilizável.

Tempo de armazenamento – tempo máximo de armazenamento durante o qual o material permanece utilizável.

Rotura adesiva – dá-se na interface entre o substrato e o adesivo.

Rotura coesiva – dá-se no interior do adesivo, quando os substratos e a ligação entre o adesivo e o substrato são mais fortes do que a resistência interna do adesivo.

ABSTRACT

The main goal of this thesis is to evaluate the effect of the thickness and type of adhesive on the mode II toughness of an adhesive joint. Two different adhesives were used, Araldite AV138/HV998 which is brittle and Araldite 2015 which is ductile.

The End Notched Flexure test was used to determine the mode II toughness because it is commonly known to be the easiest and widely used to characterize mode II fracture. The specimen is placed over a fixture in contact with two extremities and in the mean point a load is applied to promote flexure bending which will propagate the crack through the glue line.

The main conclusion is that the energy release rate for AV138 does not vary with the adhesive thickness whereas for Araldite 2015, the toughness in mode II increases with the adhesive thickness. This can be explained by the adhesive plasticity at the end of the crack tip.

Resumo

O objectivo principal desta tese é avaliar o efeito da espessura e tipo de adesivo sobre a resistência de modo II de uma junta adesiva. Dois adesivos diferentes foram usados, Araldite AV138/HV998 que é frágil e Araldite 2015 que é dúctil.

End Notched Test foi utilizado para determinar a tenacidade em modo II, porque é geralmente conhecido por ser o mais fácil e amplamente utilizada para caracterizar, fractura em modo II. A amostra é colocada sobre um dispositivo em posição fixa, apoiada nas extremidades, sendo no ponto médio aplicada uma carga para promover a flexão, que irá provocar uma curvatura, que irá propagar a fenda através da linha do adesivo.

A principal conclusão é que a taxa de libertação de energia para o AV138 não varia com a espessura do adesivo, enquanto para o Araldite 2015, a tenacidade em modo II aumenta com a espessura do adesivo. Isto pode ser explicado pela plasticidade que se desenvolve na extremidade da fenda.

Agradecimentos

Queria agradecer a total colaboração dada a este trabalho pelo meu orientador, Prof. Lucas da Silva e ao meu co-orientador Eng. Filipe Chaves que me orientaram e ajudaram na procura de informação sobre adesivos e que me ajudaram na parte laboratorial.

Agradeço também ao Laboratório de Ensaios Tecnológicos onde o Eng. Miguel Figueiredo, o Sr. Rui Silva e o Sr. Francisco Moreira me ajudaram nos ensaios.

Por fim agradeço aos meus Pais e amigos, que me motivaram para conclusão desta dissertação.

Índice

1. Introdução	8
2. Ensaio de Fractura	13
2.1. Modo II	13
2.1.1. Métodos de tratamento de resultados	14
2.1.2. Teoria das vigas	15
2.1.3. Método de CBBM	18
2.2. Modo Misto I+II	19
3. Detalhes Experimentais	22
3.1. Materiais	22
3.1.1. Adesivos	22
3.1.2. Substratos	22
3.1.3. Geometria dos provetes	23
3.2. Fabricação	23
3.2.1. Preparação do molde	24
3.2.2. Preparação dos provetes	25
3.2.3. Preparação das lâminas e dos calços	26
3.2.4. Preparação do adesivo e sua colocação nos substratos	27
3.2.5. Colocação na prensa para a cura dos provetes	28
3.2.6. Limpeza dos provetes	29
3.2.7. Preparação dos provetes para o ensaio de fractura	30
3.2.8. Ensaio de fractura em modo II e modo misto I+II	30
4. Resultados Experimentais	33
4.1. Adesivo AV138	33
4.2. Adesivo 2015	37
4.3. Comparação entre diferentes métodos de tratamento	41
4.4. Ensaio ATDCB	43
5. Conclusões	45
6. Bibliografia	46
7. Anexos	47
7.1. Gráficos obtidos do ensaio ENF para os adesivos AV138	47
7.2. Gráficos obtidos do ensaio ENF para os adesivos 2015	55

1 - Introdução

Desde os tempos pré-históricos que o homem, utilizou a técnica de colagem para proceder a ligações de peças diferentes, utilizando resinas minerais e de madeira na construção de ferramentas e machados. No antigo Egito, já era habitual empregar colas à base de gelatina, caseína, ovo e resinas extraídas de diferentes tipos de árvores, sendo o caso mais conhecido a utilização de “ Gum Arabic” extraída da Acácia .

A tecnologia de ligação por adesivos estruturais é uma tecnologia emergente que permite solucionar muitos problemas associados às técnicas tradicionais (parafusos, rebites, soldadura, etc.). A comunidade científica que investiga este tema, está em franca expansão e contam-se inúmeras aplicações práticas desde as indústrias de ponta (aeronáutica, automóvel, etc) até às indústrias mais tradicionais (calçado, móveis, etc.). A indústria aeronáutica tem sido a grande responsável pelo desenvolvimento de juntas adesivas estruturais. As aeronaves do princípio do século 20 usavam adesivos baseados em caseína, que é um material natural derivado do leite, com fraca resistência. Em meados do século 20, o problema da fraca durabilidade dos adesivos baseados em produtos naturais foi ultrapassados pelo uso de adesivos sintéticos poliméricos (resina de ureia-formaldeído).No entanto este adesivo era frágil e fracturava com facilidade. O problema da fragilidade foi ultrapassado, pela modificação da estrutura química dos adesivos adicionando polímeros com boa tenacidade. Esta técnica representou um desenvolvimento extremamente importante na tecnologia dos adesivos pois permitiu a ligação de materiais metálicos e de madeira com sucesso.

Um dos exemplos da aplicação de adesivos com maior sucesso foi o avião Fokker F27/F50 Friendship, [1], Figura 1, em que mais de 70% da sua estrutura (cerca 550 partes) foi ligada por adesivos. Este avião tinha uma grande durabilidade porque mais de 1000 aeronaves estiveram em serviço mais de 30 anos. A anodização em ácido de crómio (*CAA – chromic acid anodizing*) das superfícies de alumínio antes da colagem resultou em juntas resistentes à corrosão.

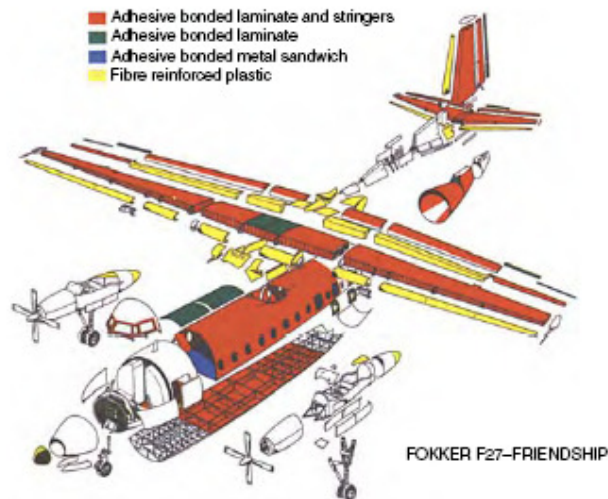


Figura 1- Figura ilustrativa das partes ligada por adesivo na aeronave Fokker F27-Friendship [1]

A indústria aeronáutica permitiu o desenvolvimento das ligações adesivas e hoje a sua aplicação noutras indústrias é cada vez mais comum e diversificada. A indústria automóvel [1], Figura 2 e 3, naval, de transporte, de construção civil e desportiva, em que a necessidade de reduzir peso e aumentar as velocidades originou o recurso a materiais leves que normalmente são difíceis de ligar pelos métodos tradicionais.



Figura 2 - Algumas das aplicações dos adesivos na indústria automóvel [1]

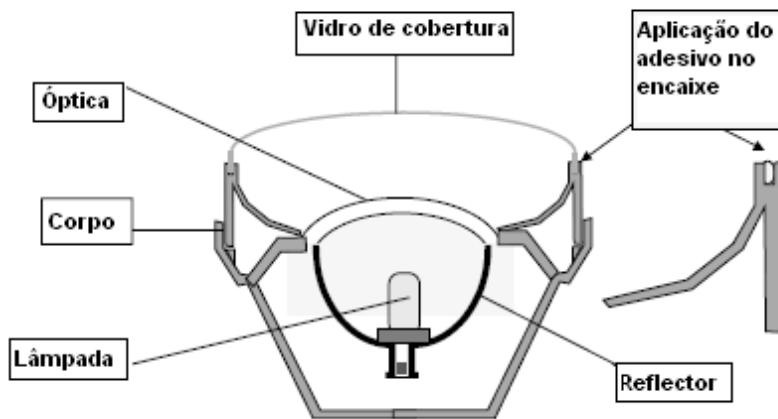


Figura 3 - Aplicação dos adesivos na construção dos faróis do BMW série 5, produzido pela Hella KG Hueck & Co. [1]

Em 1992, a Bombardier AG [1], outrora designada Schindler Waggon, produziu um comboio regional usando um adesivo de poliuretano da SIKA, onde a cabine era colada na parte restante do comboio, Figura 4. Mais recentemente, em 1 de Janeiro de 2003, a Bombardier construiu um novo comboio “*Transrapid*” para fazer a ligação entre o centro de Shangai e o aeroporto. Este comboio atinge uma velocidade de 430 km/h e inclui adesivos na sua construção, para ter elevada resistência mecânica.



a)

b)

Figura 4 -Os comboios modernos são uma combinação de vidro, plásticos e metais leves ligados com adesivos a) carroçaria do comboio b) cabine ligada com adesivos à carroçaria do comboio. [1]

As principais vantagens apontadas às ligações adesivas estruturais são:

- Distribuição uniforme das tensões na junta colada o que permite uma maior rigidez e uma melhor resistência à fadiga.
- Amortecimento de vibrações.

- Ligação de diferentes tipos de materiais entre si.
- Ligação de chapas finas.
- Melhor distribuição de tensões.
- Boa resistência à corrosão.
- Boa capacidade de vedação.
- Possibilidade de formas complexas.
- Boas técnicas de controlo de qualidade .
- Permitem ter estruturas com melhor acabamento, porque evitam furos e marcas devido a soldadura.
- Permite redução de custos, pois as ligações com adesivos tendem a ser mais económicos .

As principais desvantagens referentes a ligação com adesivos são:

- É necessário eliminar as forças de arrancamento, clivagem e impacto;
- Juntas com geometrias que evitem tensões localizadas;
- Problemas de toxicidade e inflamabilidade;
- Fraca resistência ao fogo e temperatura ;
- Necessidade de ferramentas de fixação;
- Cuidados com preparação das superfícies;
- Resistência limitada a condições extremas de calor e humidade;
- Cura dos adesivos a elevadas temperaturas (forno ou prensa).

Na Figura 5, comparam-se as distribuições de tensão teórica numa junta rebitada e numa junta colada. A distribuição de tensão mais uniforme na junta colada, em detrimento da concentração de tensões observadas na junta rebitada, permite ter uma melhor resistência à fadiga - [2].

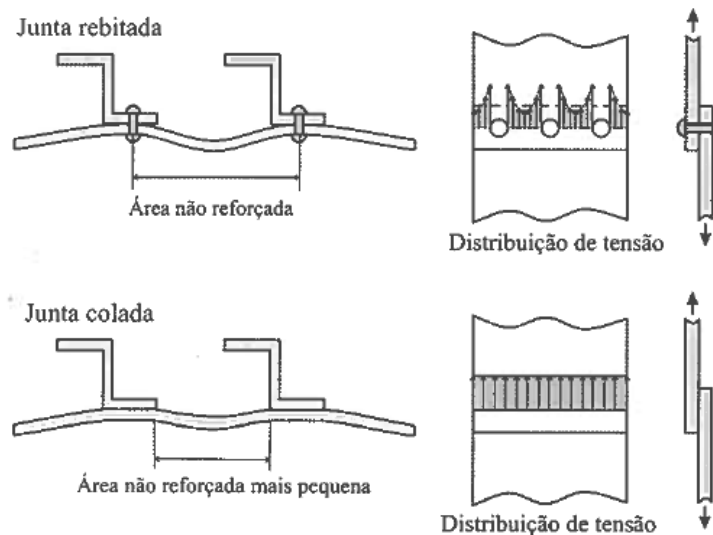


Figura 5 – Comparação entre uma superfície rebitada e uma superfície colada, [2]

Existem dois métodos para projectar juntas adesivas. O primeiro baseia-se na mecânica dos meios contínuos que assume que a estrutura e os materiais que a constituem são contínuos, não tendo em conta os defeitos nem a presença de diferentes materiais. Exemplos de estudos sobre juntas adesivas usando este método para dimensionar juntas são os de Goland and Reissner [3], Adams and Harris [3], Hart-Smith [3] e Adams e Mallick [3], implementados em software por da Silva et al. [3]. Considera-se que a junta colapsa quando a tensão ou a deformação no adesivo atinge um limite crítico.

No entanto, as juntas adesivas podem conter defeitos como fendas. Para tratar estes problemas, foi desenvolvida a mecânica da fractura. Para poder aplicar este método é necessário ter a tenacidade do adesivo. A tenacidade varia em função do modo de carregamento, i.e., modo I, modo II e modo III. Existe na literatura muita informação relativamente ao modo I. No entanto, o modo II (corte) é muito importante nas juntas adesivas e deve também ser estudado. Por outro lado, as juntas adesivas reais como a junta de simples sobreposição são solicitadas em modo misto I + II. Torna-se assim necessário determinar a tenacidade nestas condições.

2 - Ensaio de Fractura

2.1 - Modo II

No caso de modo II a maioria dos ensaios realizados para cálculo da fractura interlaminar são:

- ENF (*End Notched Flexure*)
- ELS (*End Loaded Split*)
- 4ENF (*Four-point End Notched Flexure*)

A Figura 6 mostra os diferentes tipos de ensaios, para caracterização à fractura interlaminar em modo II.

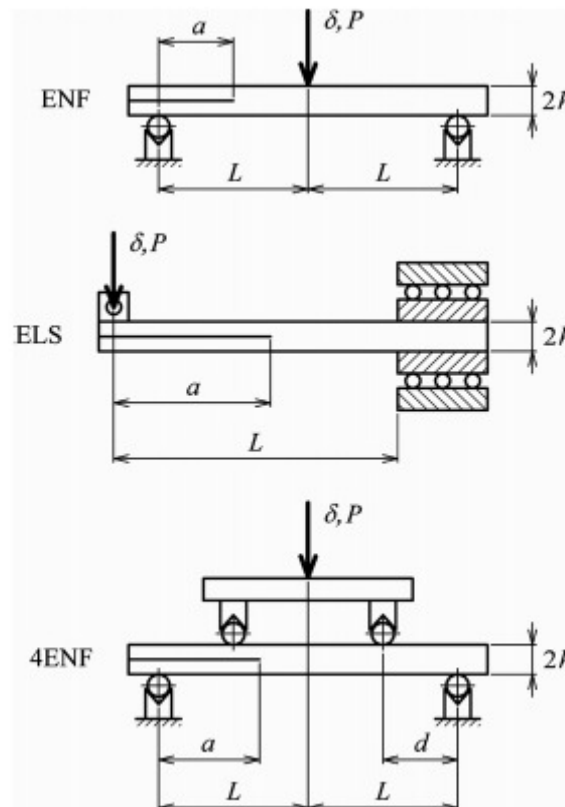


Figura 6 – Representação esquemática dos ensaios para caracterização à fractura em modo II

O ensaio ELS, apresenta algumas dificuldades na correcta obtenção da taxa crítica de libertação de energia, G_{IIc} , relacionadas com a existência de grandes deslocamentos e alguma sensibilidade às condições de aperto, [2]. O ensaio 4ENF

requer um dispositivo de ensaio mais sofisticado e apresenta alguns problemas relacionados com a influência do atrito na região da pré-fenda [2].

O mais utilizado e talvez o mais simplificado, para a caracterização da fractura em modo II é o ENF. No ensaio ENF o provete é colocado numa posição de viga simplesmente apoiada nos seus extremos, sendo aplicada uma carga a meio vão, através de um gabarit (Figura 7). Essa carga a meio vão irá provocar a propagação da fenda que se pretende estável ao longo da junta adesiva.

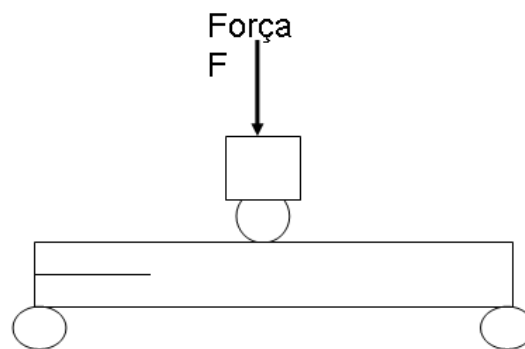


Figura 7 – Representação esquemática do provete no ensaio ENF com o gabarit

2.1.1 - Métodos de tratamento de resultados

Existem diversos métodos de tratamento de resultados tais como:

- Teoria das vigas elementares (TVE)
- Método de calibração de flexibilidade (MCF)
- Teoria das vigas corrigidas (TVC)
- Método de calibração da flexibilidade baseado na teoria das vigas
- Teoria das vigas
- Método CBBM

No ensaio ENF o tipo de solicitação provoca dificuldades na medição do comprimento da fenda durante a sua propagação, pois a fenda propaga-se com os braços do provete encostados, o que praticamente torna muito difícil a correcta medição do comprimento de fenda, a , [1]. Existem diversos processos de análise de dados. Um dos

processos baseia-se na teoria de vigas, onde se assume que os braços do provete na zona da fenda actuam como duas vigas independentes, suportando cada uma delas metade da carga aplicada. Outra análise de tratamento de dados recorre ao método CBBM – *Compliance Based Beam Method* [2], que se baseia unicamente na flexibilidade do material. No método CBBM é unicamente necessário registar os valores da força aplicada e do deslocamento, o que pode ser considerado vantajoso tendo em conta as dificuldades na medição da propagação da fenda durante o ensaio, sendo a presença da FPZ contabilizada, uma vez que esta influencia a flexibilidade do material.

2.1.2 - Teoria das vigas

Seguidamente procede-se a uma análise do método da teoria das vigas. Assume-se que os dois braços do provete actuam na zona da fenda como duas vigas independentes, cada uma delas suportando metade da carga aplicada (Figura 8).

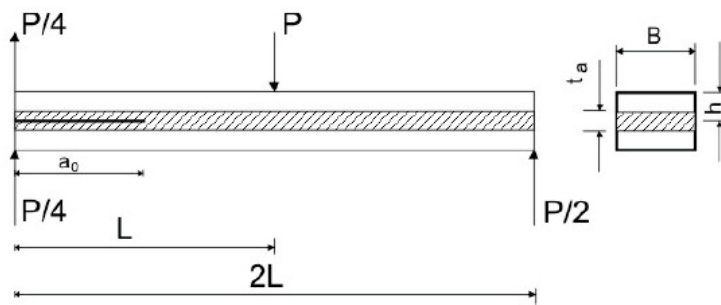


Figura 8 – Diagrama de corpo livre do ensaio ENF [2]

A energia de deformação é dada por

$$U = \int_0^{2L} \frac{M_f^2}{2EI} dx + \int_0^{2L} \int_{-h}^h \frac{\tau^2}{2G} b dy dx \quad (1)$$

Sendo que E e G são os módulos de Young e de Corte, I o momento de inercia, M_f o momento flector, τ a tensão de corte ao longo da espessura.

A componente de flexão da viga, quando esta esta dividida em três partes ($0 \leq x \leq a$; $a \leq x \leq L$; $L \leq x \leq 2L$) é escrita por:

$$U_f = 2 \int_0^a \frac{(Px/4)^2}{2EI/8} dx + \int_a^L \frac{(px/2)^2}{2EI} dx + \int_L^{2L} \frac{(Px/2 - P(x-L))^2}{2EI} dx \quad (2)$$

e a de corte

$$U_c = 2 \int_0^a \int_{-h/2}^{h/2} \frac{\tau^2(c=h/2)}{2G} b dy dx + \int_a^L \int_{-h}^h \frac{\tau^2(c=h)}{2G} b dy dx \quad (3)$$

Sabendo que τ pode ser calculado por

$$\tau = \frac{3P}{2A} \left(1 - \frac{y^2}{c^2} \right) \quad (4)$$

Em que $A = bh$ e $c = h/2$. Aplicando as duas equações da energia, o teorema de Castigliano e com τ obtido, o deslocamento no ponto de aplicação da força é definido por [4]

$$\delta = \frac{dU}{dP} = \frac{P(3a^3 + 2L)}{12EI} + \frac{3PL}{10Gbh} \quad (5)$$

Tendo em conta que $C = \delta / P$ e considerando a equação Irwin-Kyes

$$G_c = \frac{P_c^2}{2b} \frac{dC}{da} \quad (6)$$

Obtém-se assim que

$$G_{IIc} = \frac{9P_c^2 a^2}{16b^2 E h^3} \quad (7)$$

A taxa crítica de libertação de energia em modo II pode também ser obtida através da aplicação directa da Equação 6. Neste caso é necessária uma calibração prévia da flexibilidade C que envolve a realização de ensaios de flexão com diferentes comprimentos de fenda. No caso do ensaio ENF, isso consegue-se alterando a posição do provete nos suportes. O ajuste de resultados faz-se recorrendo a um polinómio

cúbico, que estabelece uma relação similar à Equação 5 em que a calibração da flexibilidade (método de calibração de flexibilidade) é

$$C = C_0 + ma^3 \quad (8)$$

Substituindo na equação de Irwin, Equação 6, permite determinar a taxa crítica de libertação de energia.

$$G_{IIC} = \frac{3ma^2P_c^2}{2b} \quad (11)$$

Contudo através da Teoria das Vigas Corrigidas (TVC), proposto por Wang e Williams [5], G_{IIC} é determinado através da seguinte equação,

$$G_{IIC} = \frac{9P_c^2(a + \Delta)^2}{4b^2h^3E_f} F \quad (12)$$

Onde Δ é o factor de correcção do comprimento de fenda que contempla o efeito do esforço transversal, que se determina a partir da regressão linear de $C^{\frac{1}{3}}$ vs a (fenda), Figura 9. Assim, o parâmetro Δ , incorpora os efeitos de corte e da rotação na extremidade da fenda.

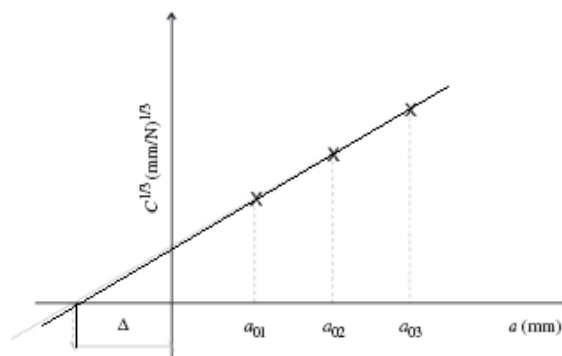
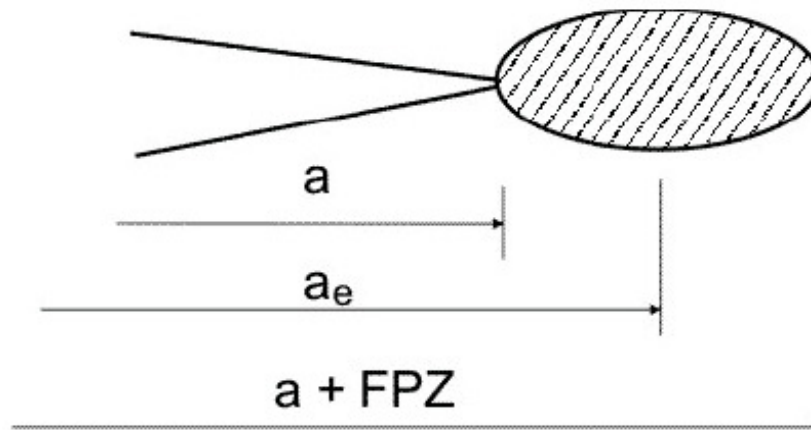


Figura 9 - Determinação da correcção Δ

2.1.3 - Método CBBM (*Compliance-Based Beam Method*)

O cálculo e a caracterização da fractura em modo II, usando a teoria das vigas é difícil, devido à enorme dificuldade de visão clara da propagação da fenda. Um outro aspecto está relacionado com a dimensão da zona de processo de fractura (*Fracture Process Zone* – FPZ). A zona de processo de fractura é uma região de material afectada por fenómenos de plasticidades (microfissuração, macrodeformação plástica) localizada no início da extremidade da fenda, Figura 10.



a – Fenda inicial

a_e - Fenda equivalente

FPZ – *Fracture Process Zone*

Figura 10 – Representação da Zona de Processo de Fractura e fenda equivalente

Para ultrapassar estas dificuldades, de Moura & Morais [4, 6] propuseram uma nova técnica de tratamento de dados baseado no conceito da fenda equivalente, que não necessita da medição do comprimento da fenda.

A equação da flexibilidade, a partir da Equação 5 é

$$C = \frac{3a_0^2 + 2L}{12EI} + \frac{3L}{10Gbh} \quad (13)$$

O módulo à flexão do provete pode ser obtido considerando a flexibilidade inicial C_0 , e o comprimento de fenda inicial a_0 na equação 13,

$$E_f = \frac{3a_0^3 + 2L^3}{12EI} \left(C_0 - \frac{3L}{10Gbh} \right)^{-1} \quad (14)$$

O efeito do fenómeno de FPZ deve ser incluído na consideração da flexibilidade e fenda equivalente durante a sua propagação. Substituindo o módulo E da Equação 13 pela Equação 14, obtém-se o comprimento da fenda equivalente [7].

$$a_e = a + \Delta a_{FPZ} = \left[\frac{C_{corr}}{C_{0corr}} a_0^3 + \frac{2}{3} \left(\frac{C_{corr}}{C_{0corr}} - 1 \right) L^3 \right] \quad (15)$$

Onde C_{corr} é dado por

$$C_{corr} = C - \frac{3L}{10Gbh} \quad (16)$$

Assim, a taxa crítica de libertação de energia em modo II com recurso ao método CBBM pode ser calculada substituindo o valor de a_e na Equação 7:

$$G_{IIC} = \frac{9P_c^2 a_e^2}{16b^2 E_f h^3} \quad (17)$$

Esta metodologia permite obter a tenacidade em modo II usando apenas as curvas força vs deslocamento (P- δ). Por esta razão, usando o método CBBM, não é necessário recorrer à medição da propagação do crescimento da fenda, bastando para isso calcular a fenda equivalente a_e , que inclui no seu cálculo o efeito da FPZ na fenda real, sendo que o fenómeno da FPZ varia para as diferentes espessuras do adesivo.

2.2- Modo misto I + II

Para caracterizar a energia de fractura de juntas coladas de adesivos em modo misto, é necessário recorrer a equipamentos especiais ou a uma variedade de configurações de testes. Existem diversos ensaios para a caracterização do comportamento de juntas coladas em modo misto (I+II).

O ensaio *Mixed-Mode Flexure* (MMF) [2] é similar ao ensaio ENF, pois no ensaio MMF uma das extremidades do provete está apenas apoiada no braço superior, o que origina um modo de abertura em modo I e também um modo de corte (modo II), Figura 11.

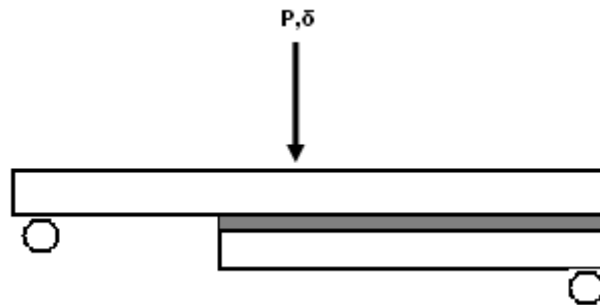


Figura 11- Representação esquemática do ensaio MMF.

Uma outra alternativa é o ensaio ADCB (*Asymmetric Double Cantilever Beam*) [2] em que a diferença de espessuras dos braços do provete origina a combinação de solicitações, Figura 12.

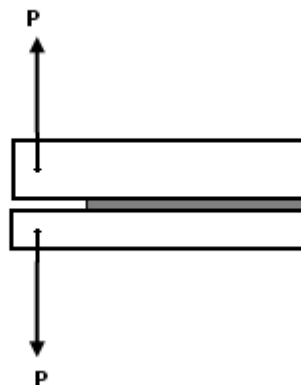


Figura 12 – Representação esquemática do ensaio ADCB.

Uma outra alternativa idealizada por Park e Dillard [8] usa uma técnica que consiste em juntar um braço em cunha de um provete TDCB (*Tapered Double Cantilever Beam*) com um braço do provete DCB de espessura constante, ao qual deram o nome de ATDCB (*Asymmetric Tapered Double Cantilever Beam*), Figura 13.

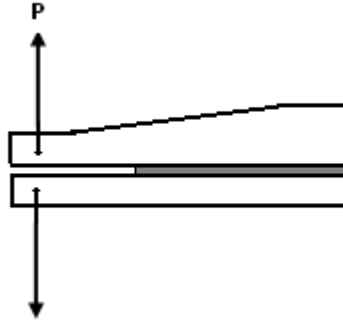


Figura 13 – Representação Esquemática do ensaio ATDCB

A propagação da fenda e a rigidez relativa do aderente varia de forma sistemática, resultando numa mixicidade de cerca de 20°. A taxa crítica de libertação de energia para provetes assimétricos pode ser obtida através da teoria das vigas de Euler-Bernoulli [8].

Para os provetes assimétricos, a equação da flexibilidade é composta por duas componentes, a parte do provete constante (C_{Const}) e a parte do provete inclinado (C_{Taper}) [8]:

$$C_{Total} = C_{Const} + C_{Taper} \quad (18)$$

Em que

$$C_{Const} = \frac{2a^3}{3EI_{Const}} \quad (19)$$

$$C_{Taper} = \frac{2a^3}{3EI_{Taper}} \quad (20)$$

A taxa crítica de libertação de energia pode ser expressa, usando a Equação 6,

$$G_{Total} = \frac{P^2}{2b} \frac{d(C_{Const} + C_{Taper})}{da} \quad (21)$$

Mas como a tenacidade do ATDCB é metade de G_{Total} . A tenacidade ATDCB, pode ser expressa como, [8]

$$G_{ATDCB} = \frac{1}{2} \left[\frac{P^2}{2b} \frac{d(C_{Const})}{da} + \frac{P^2}{2b} \frac{d(C_{Taper})}{da} \right] \quad (22)$$

3 – Detalhes experimentais

3.1 – Materiais

3.1.1 - Adesivos

Selecionou-se um adesivo frágil AV 138M/HV 998 (Huntsman) e um adesivo dúctil Araldite 2015 (Huntsman). Algumas das características mecânicas dos dois adesivos estão expressas na Tabela 1.

Tabela 1 – Características Mecânicas dos dois adesivos [9]

Adesivo	Araldite AV138M/HV998	Araldite 2015
Módulo de corte G [MPa]	1559 ± 11	487 ± 77
Tensão de cedência de corte τ_{ya} [MPa]	25.0 ± 0.55	17.9 ± 1.8
Tensão de rotura de corte τ_r [MPa]	30.2 ± 0.4	17.9 ± 1.8
Deformação de rotura de corte γ_f [%]	5.5 ± 0.4	43.9 ± 3.4

3.1.2 - Substratos

Para os substratos, o material usado foi o aço tratado DIN 40CrMnMo7, fornecido pela empresa Universal AFIR. São apresentadas na Tabela 2 algumas das características mecânicas do aço.

Tabela 2 – Características Mecânicas do aço

Aço	DIN 40Cr Mn Mo7
Resistência à tracção [MPa]	1000 - 1068
Tensão limite de elasticidade [MPa]	861 – 930
Extensão após rotura [%]	14 - 17

- Preparação dos provetes;
- Preparação das lâminas e calços;
- Preparação dos adesivos e sua colocação nas juntas;
- Colocação na prensa para a cura dos provetes;
- Limpeza dos provetes;
- Preparação dos provetes para o ensaio de fractura em modo II
- Ensaio de fractura em modo II e modo misto I+II

3.2.1 – Preparação do molde

O molde usado para a produção de junta adesivas está representado na Figura 16. Permite fazer até seis provetes de cada vez.

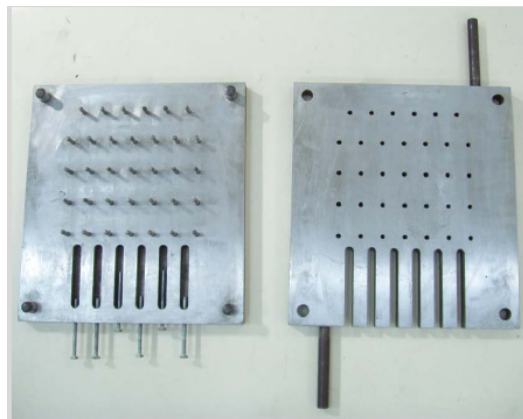


Figura 16 – Molde para preparação das juntas adesivas.

Antes da colocação dos provetes, deve-se garantir uma perfeita limpeza da superfície do molde. Para isso utilizam-se folhas de papel embebidas em acetona para limpar a sujidade e pó existentes no molde, Figura 17. No caso de haver alguns resíduos de adesivo na superfície do molde, estes devem ser retirados com recurso a uma espátula de alumínio mas com algum cuidado para não provocar riscos no molde.



Figura 17 – Limpeza do molde.

Após a limpeza, coloca-se o molde na prensa de aquecimento, aquecendo-o até 45 °C. Retira-se o molde da prensa, aplica-se o desmoldante *Frekote 770 – NC da Loctit*, com auxílio de um pincel, através de 3 passagens, na superfície das duas faces do molde. Em cada passagem tenta-se garantir uma aplicação homogénea por toda a superfície interior do molde. O aquecimento do molde tem como principal objectivo aumentar a velocidade de reacção de cura do desmoldante. A aplicação do *Frekote 770 – NC* requer alguns procedimentos de segurança em virtude de ser um químico tóxico.

3.2.2 - Preparação dos Provetes

Para a preparação dos provetes, utilizou-se a grenalhagem em jacto de areia, que consiste em projectar partículas abrasivas de SiO_2 (areia), sobre a superfície a tratar. Na Figura 18 representa-se a grenalhadora.



Figura 18 – Grenalhadora.

Após o tratamento deve-se, ter atenção à limpeza das superfícies obtidas.

3.2.3 - Preparação das lâminas e calços

Com recurso à fita de aço calibrada apresentada na Figura 19, conseguimos impor a espessura de adesivo pretendida.



Figura 19 – Fita calibrada

Na Figura 18, está representado o esquema de colocação das fitas calibradas. A fita utilizada na posição 1 da Figura 20 apresenta uma ligeira saliência (lâmina), de forma a garantir uma pré-fenda ao adesivo, facilitando assim a iniciação da fenda.

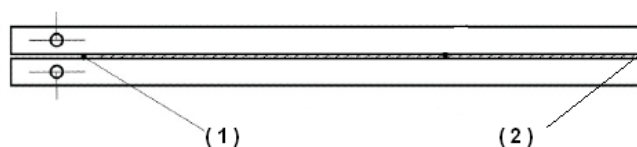


Figura 20 – Colocação da lâmina (1) e do calço (2)

3.2.4 - Preparação do adesivo e sua colocação nos substratos

Após grenalhar os provetes e executar a limpeza da superfície do molde, passa-se para a fase de preparação do adesivo e sua colocação nos substratos. É necessário evitar ultrapassar com o tempo de vida (*pot life*) dos adesivos.

O adesivo estrutural Araldite AV 138M é um adesivo epóxico de dois componentes composto por uma resina AV 138M e um endurecedor HV 998. Os dois componentes estão representados na Figura 21 a) e b).



Figura 21 – a) Recipientes da resina AV 138M e do endurecedor HV 998. b) Mistura dos dois componentes (resina bege, endurecedor cinza)

A mistura dos dois componentes (resina + endurecedor) deve ser feita numa razão de 100/40 respectivamente. Deve-se proceder à mistura, até obter uma pasta homogénea de cor cinzenta, com o cuidado de não introduzir muitas bolhas de ar no adesivo.

A aplicação do adesivo estrutural Araldite AV 138M/ HV 998 é executada manualmente, devendo ser aplicado através de uma espátula nas superfícies a ligar.

O adesivo estrutural Araldite 2015 é uma pasta adesiva de epóxico. Este adesivo é fornecido em cartuchos, pronto aplicar com uma pistola própria, como representado na Figura 22 a). As pistolas permitem uma deposição em forma de cordão que facilita a aplicação do adesivo, Figura 22 b) .



Figura 22 – a) Cartucho do adesivo Araldite 2015 e pistola de aplicação. b) Aplicação do adesivo Araldite 2015 nos substratos.

É preciso ter em atenção a escolha do local de trabalho que deve ser uma zona limpa e arejada, com possibilidade de utilização de exaustores e luvas de protecção, pois este materiais libertam gases nocivos para saúde.

3.2.5 - Colocação na prensa para a cura dos provetes

Após terminar o processo de aplicação do adesivo, o contacto entre os substratos deve ser estabelecido o mais rapidamente possível para evitar uma contaminação da área de colagem. Para desencadear o processo de reticulação desejado, é necessário iniciar a cura do adesivo, que envolve a aplicação de uma pressão e de uma temperatura, que varia conforme os adesivos. A pressão aqui utilizada é apenas para garantir que há encosto dos substratos e tentar reduzir alguma porosidade. O tempo de cura dos adesivos foi neste caso de cerca de 16h a uma temperatura constante de 45°C para o adesivo Av138M/Hv998 e cerca de 6h a uma temperatura constante de 45°C para o adesivo 2015.

O dispositivo utilizado para o processo de cura foi uma prensa hidráulica de pratos quentes, *Intoco*, representada na Figura 23.

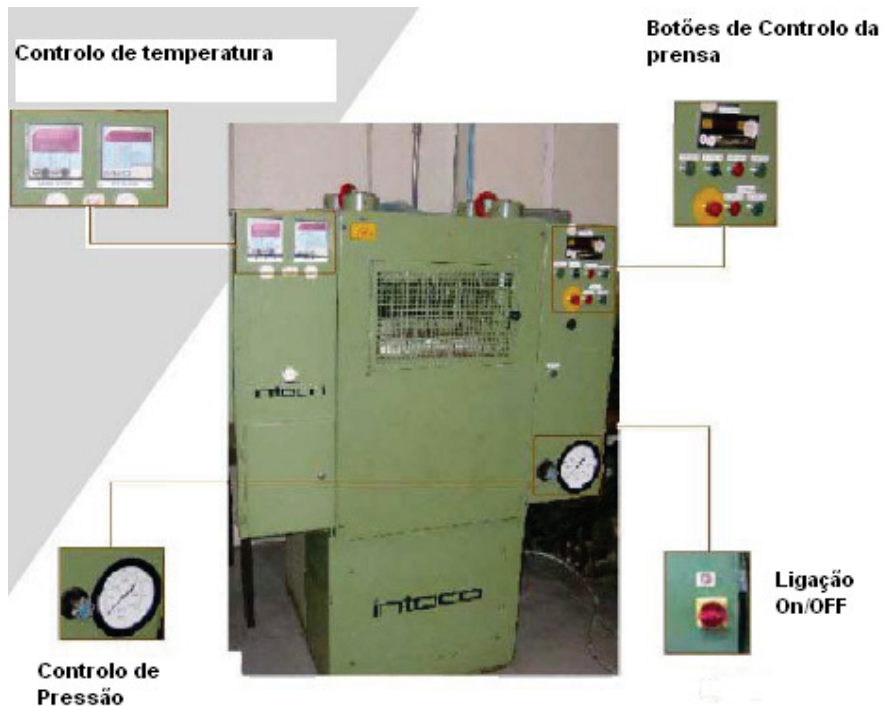


Figura 23 – Prensa hidráulica

Nas Figuras 24 a) e Figuras 24 b) estão representados os cuidados para alinhar os provetes lateralmente e de topo, para estes curarem na posição correcta.

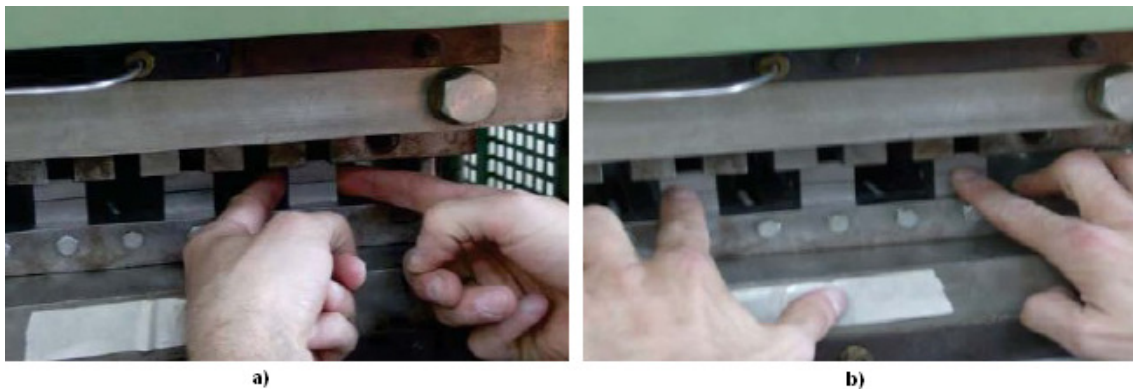


Figura 24 – a) Alinhamento lateral dos provetes. b) Alinhamento de topo dos provetes

Após o processo de cura procede-se ao arrefecimento do molde até atingir a temperatura ambiente. O molde é retirado da prensa, aberto e os provetes removidos.

3.2.6 - Limpeza dos provetes

A limpeza dos provetes consiste na remoção do excesso de adesivo que ficou colado nas partes laterais do provetes. Normalmente utiliza-se um x-acto ou com uma peça de alumínio afiada. Para concluir melhor a limpeza, recorreu-se a uma rebarbadeira.

3.2.7 - Preparação dos provetes para ensaio de fractura

Depois de os provetes estarem completamente limpos, aplicou-se tinta de corrector na linha da junta do adesivo para melhorar a visibilidade da fenda ao longo da junta durante o ensaio.

3.2.8 - Ensaio de fractura em modo II e modo misto I+II

Para o ensaio de fractura ENF em modo II, recorreremos a uma máquina servo hidráulica MTS 312.31. Registou-se a força e o deslocamento para posterior determinação da taxa crítica de libertação de energia G_{IIc} .



Figura 25 – Provede ENF colocado na MTS para ensaio

No ensaio ENF o provede é colocado numa posição de viga simplesmente apoiada nos seus extremos, sendo aplicada uma carga a meio vão, através de uma gabarit, Figura 25. Para o ensaio ENF foram testados 8 provedes do adesivo AV138M/HV998 e 9 provedes do adesivo 2015, para diferentes espessuras. A velocidade de solicitação dos ensaios foi de 0,25 mm/min. Na Tabela 3, estão representados os ensaios ENF realizados para o adesivo AV138M/HV998.

Tabela 3 – Ensaios realizados para o adesivo AV138M/HV998 em ENF

N.º de ensaios realizados do adesivo AV 138M/HV998 Ensaio ENF	Nome do provete ensaiado	Espessura [mm]
2	ENF_0.2_138a	0.2
	ENF_0.2_138b	
3	ENF_0.5_138a	0.5
	ENF_0.5_138b	
	ENF_0.5_138c	
3	ENF_1_138a	1
	ENF_1_138b	
	ENF_1_138c	

Na Tabela 4, estão representados os ensaios ENF realizados para o adesivo 2015

Tabela 4 - Ensaios realizados para o adesivo 2015 em ENF

N.º de ensaios realizados do adesivo 2015 Ensaio ENF	Nome do provete ensaiado	Espessura [mm]
4	ENF_0.2_2015a	0.2
	ENF_0.2_2015b	
	ENF_0.2_2015c	
	ENF_0.2_2015d	
2	ENF_0.5_2015a	0.5
	ENF_0.5_2015b	
3	ENF_1_2015a	1
	ENF_1_2015b	
	ENF_1_2015c	

No ensaio ATDCB em modo misto I+II, o provete é colocado conforme representado na Figura 26, na máquina MTS. Para o ensaio ATDCB foram ensaiados 3 provetes do adesivo AV 138M/HV998. A velocidade de sollicitação foi de 0.1mm/min.

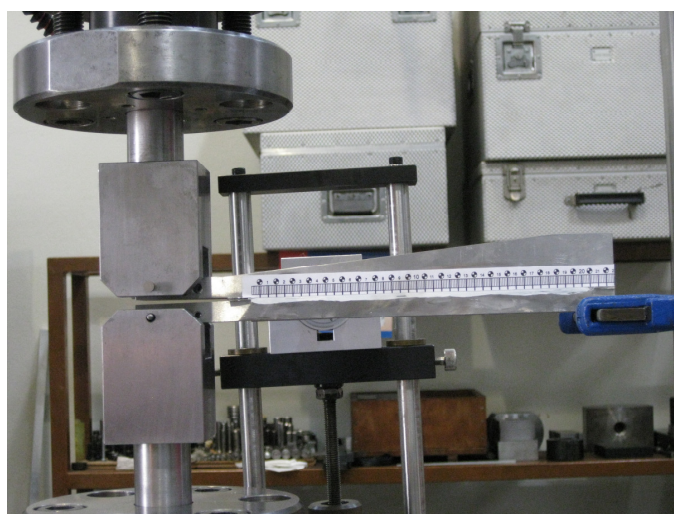


Figura 26 – Ensaio ATDCB

4 - Resultados Experimentais

4.1 - Adesivo AV 138

Após ensaiar os provetes e proceder ao tratamento dos dados, obtiveram-se os seguintes gráficos força vs deslocamento e os gráficos das curvas R. As curvas P- δ são utilizadas para obter a curva R. Para isso usou-se o método CBBM (*Compliance-Based Beam Method*) onde é unicamente necessário registar os valores da força aplicada e do deslocamento. As curva R relacionam a tenacidade com a propagação da fenda. Permitem identificar o valor de G_{IIc} correspondente a um patamar para o qual existe uma propagação da fenda.

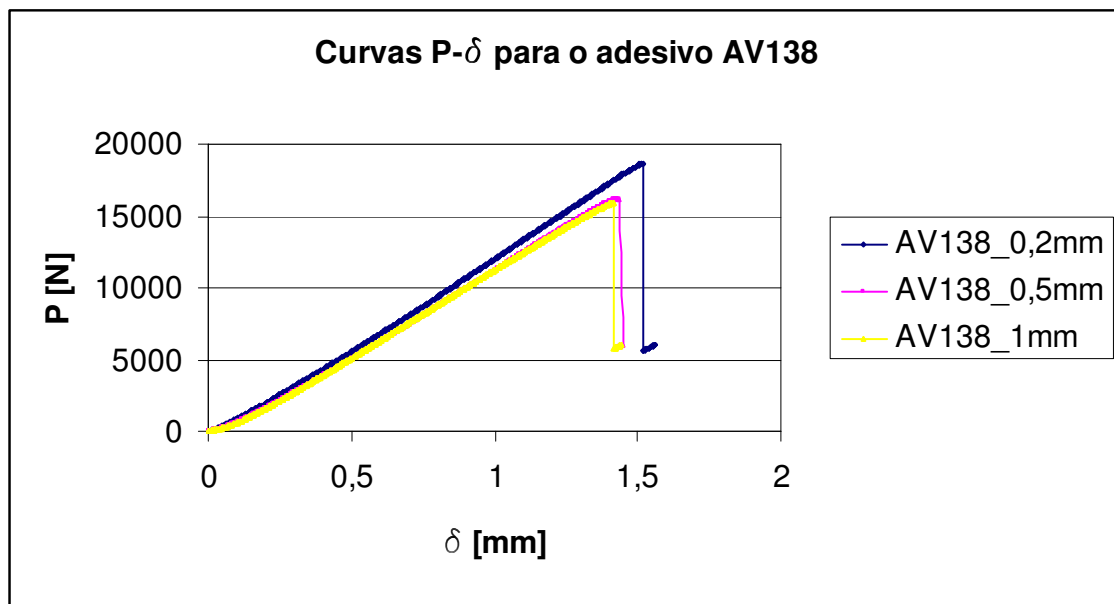


Figura 27 – Curvas P- δ em função da espessura do adesivo AV138

Na Figura 27 estão representadas as curvas P- δ em função da espessura do adesivo AV 138. As curvas apresentadas demonstram que se trata de um adesivo com um comportamento de rotura frágil, onde se verifica uma rotura abrupta com valores baixos de deformação.

As curvas R para o adesivo AV138 são as seguintes,

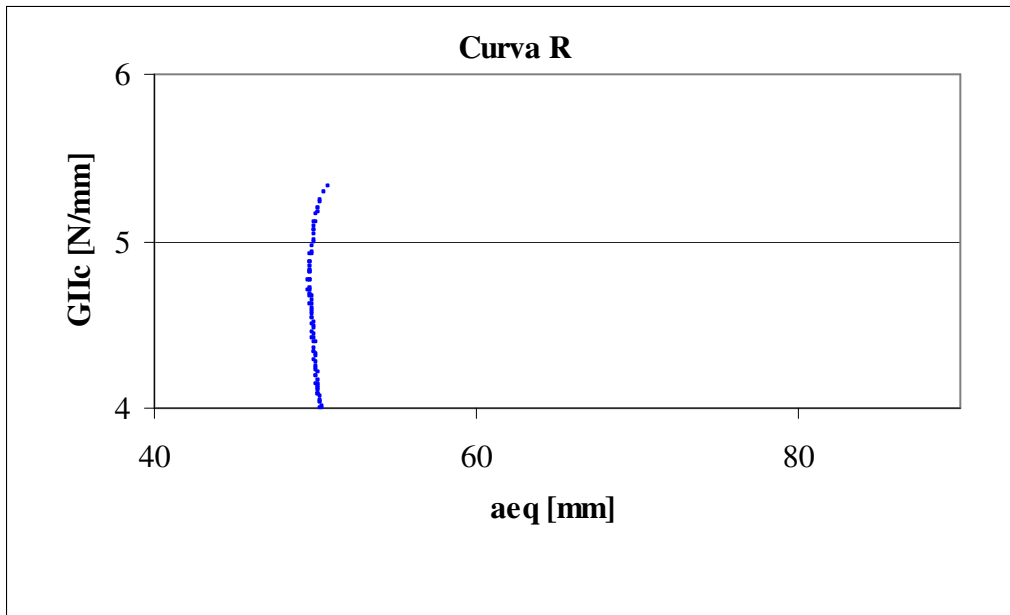


Figura 28 – Curva R do adesivo AV138 com uma espessura de 0.2mm

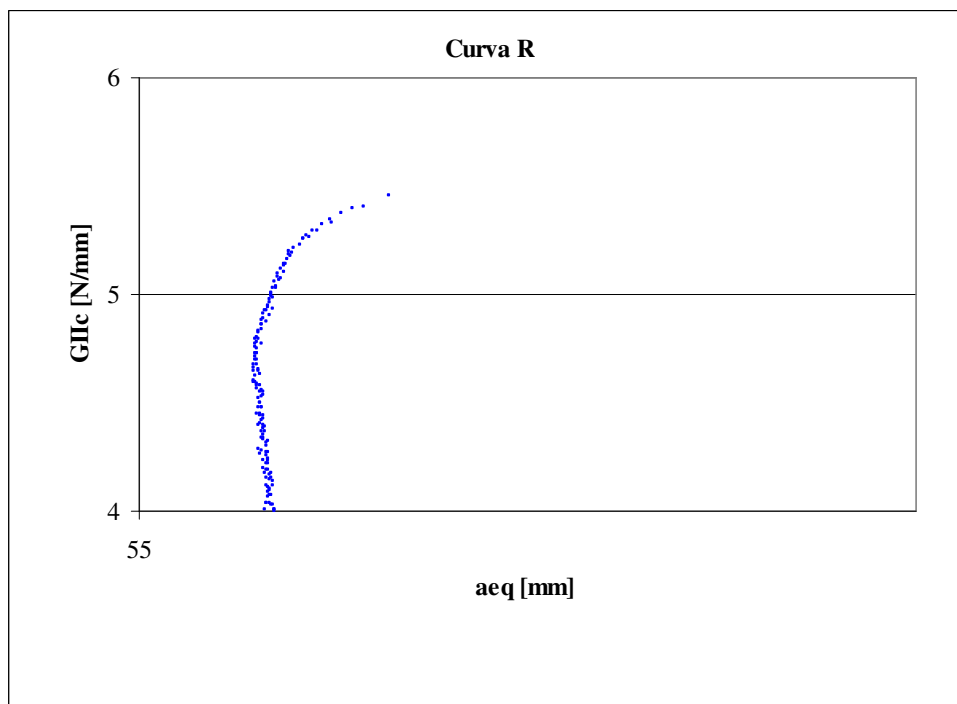


Figura 29 – Curva R do adesivo AV138 com uma espessura de 0.5mm

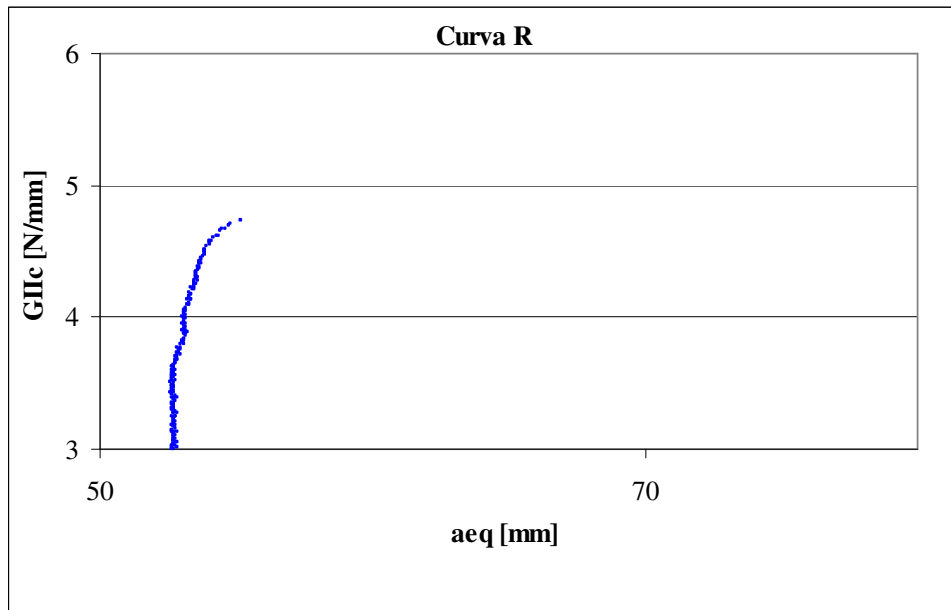


Figura 30– Curva R do adesivo AV138 com uma espessura de 0.5mm

Como o Adesivo AV138 apresenta uma propagação de fenda muito rápida, as curvas R não apresentam um patamar correspondente a um propagação de fenda estável e progressiva.

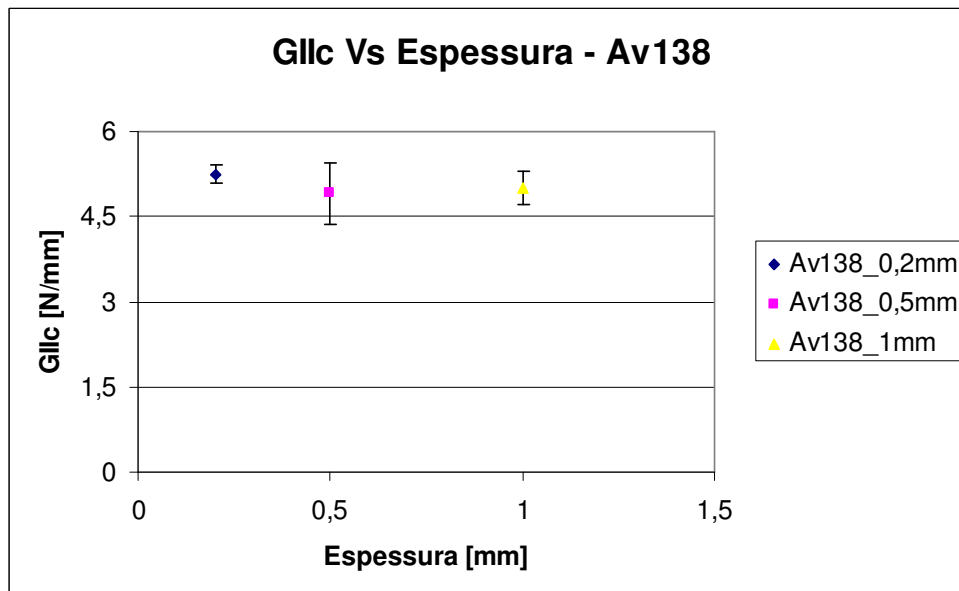


Figura 31 – Taxa crítica da libertação de energia G_{IIc} do adesivo AV 138 em função da espessura

As taxas críticas de libertação de energia G_{IIc} para o adesivo AV138 em função das espessuras estão representadas na Figura 31. O adesivo AV138 tem um G_{IIc} insensível à espessura do adesivo. Este fenómeno ocorre em virtude do AV 138 ser um

adesivo frágil, com uma rotura abrupta, que não desenvolve fenómenos de plasticidade na fenda, não sendo afectado pela FPZ.



Figura 32 – Roturas coesivas no adesivo AV138

Na Figura 32 estão representadas as roturas coesivas do adesivo AV138 no ensaio ENF .

4.2 - Adesivo 2015

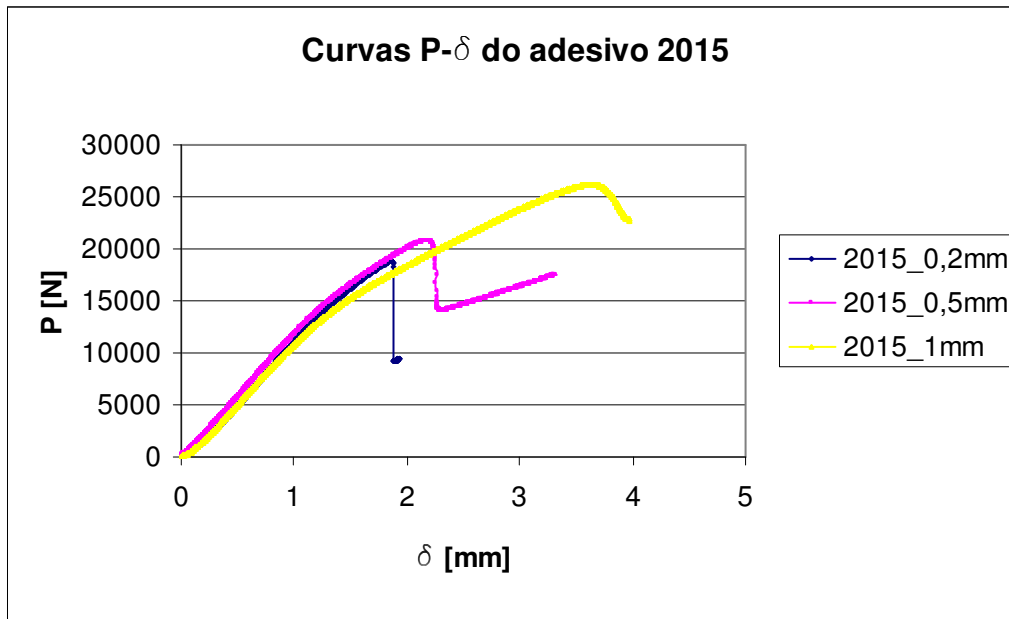


Figura 33 – Curvas P- δ em função da espessura para o adesivo 2015

Na Figura 33 estão representadas as curvas P- δ em função da espessura do adesivo 2015. As curvas P- δ do adesivo 2015 apresentam um comportamento dúctil, com sinais de deformação plástica permanente. As curvas P- δ para o adesivo 2015 apresentam um comportamento não linear, relacionado com o desenvolvimento de uma Zona de Processo de Fractura (FPZ) na extremidade da fenda.

Podemos observar nas Figuras 34, 35 e 36 as curvas R para o adesivo 2015 com diferentes espessuras. Sendo o adesivo 2015 dúctil é possível observar patamares nas curvas R correspondentes a uma propagação estável e progressiva da fenda.

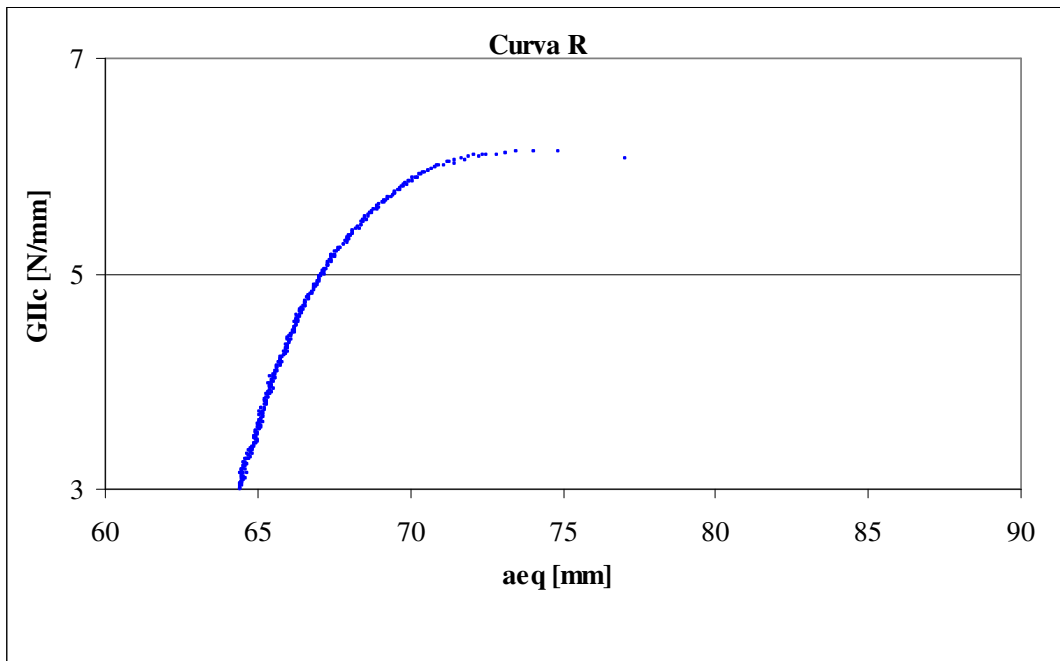


Figura 34- Curva R do adesivo 2015 com uma espessura de 0.2mm

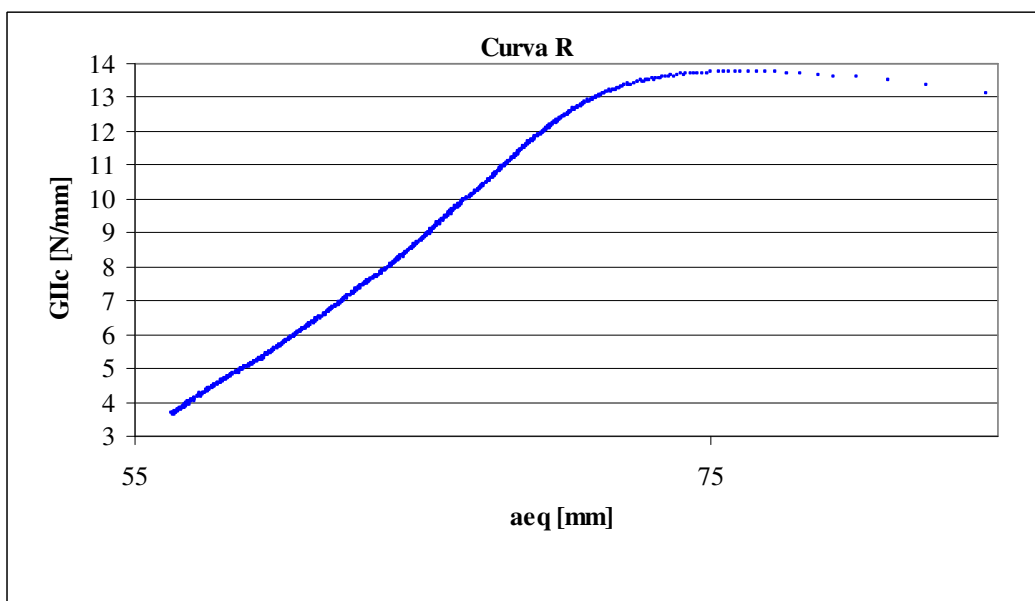


Figura 35 – Curva R do adesivo 2015 com uma espessura de 0.5mm

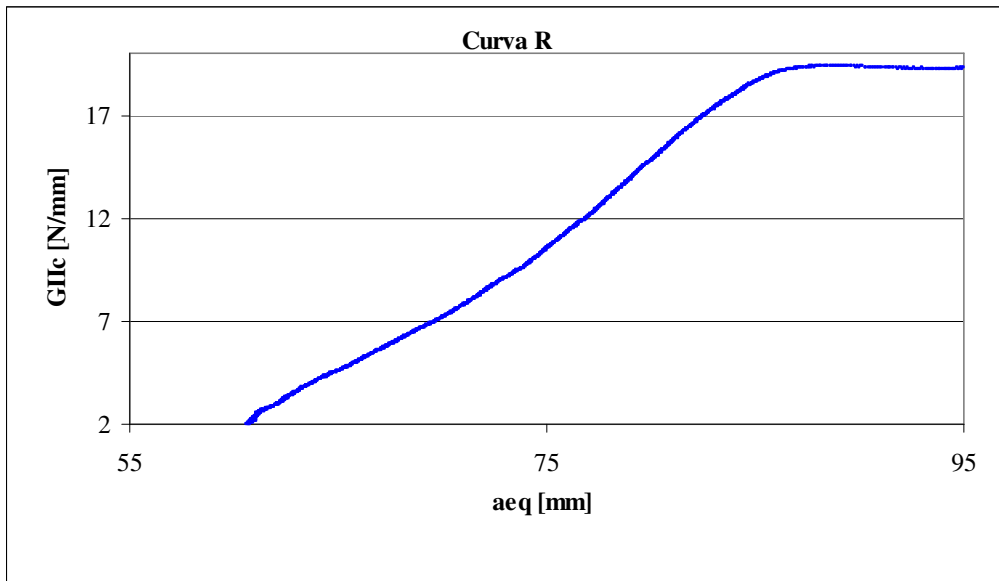


Figura 36 – Curva R do adesivo 2015 com uma espessura de 1mm

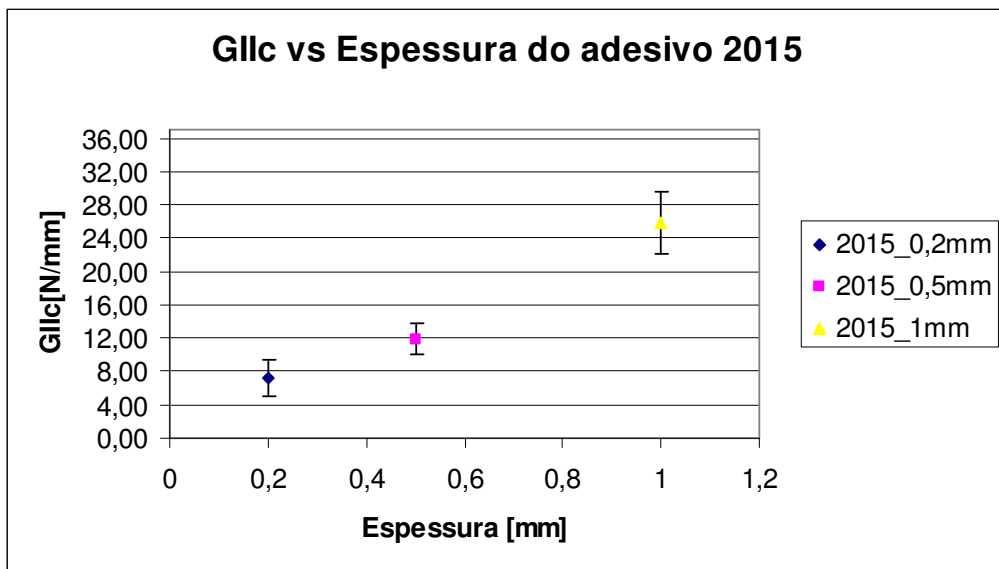


Figura 37 – Taxa crítica da libertação de energia do adesivo 2015 em função da espessura

As taxas críticas de libertação de energia G_{IIc} para as diferentes espessuras do adesivo 2015 estão expressas na Figura 37. O valor de G_{IIc} aumenta com um aumento da espessura do adesivo 2015. Isto ocorre em virtude do adesivo 2015 ser dúctil e desenvolver plasticidade, ocorrendo o fenómeno da FPZ na zona da propagação da fenda.

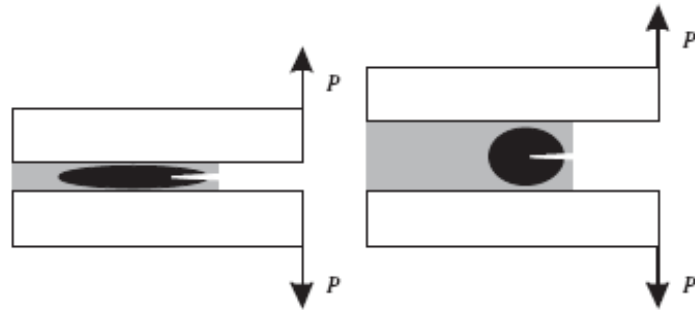


Figura 38 – Representação da FPZ em função da espessura[6]

Podemos ver na Figura 38 o efeito da FPZ, que varia em função da espessura do adesivo, influenciando a fractura e a progressão da fenda.

Na Figura 39 podem-se observar as roturas coesivas no adesivo 2015 para o ensaio ENF.



Figura 39 – Roturas coesivas no adesivo 2015

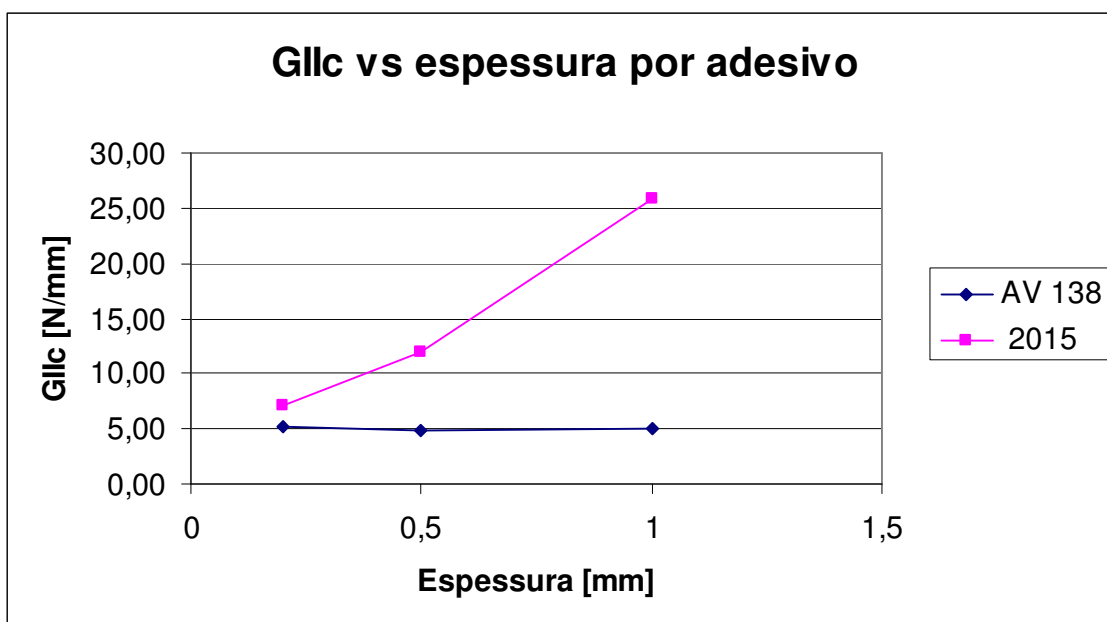


Figura 40 - Comparação da taxa crítica da libertação de energia em função da espessura para os adesivos AV 138 e 2015

Na Figura 40 é possível ver a diferença de comportamento entre os dois adesivos AV 138 e 2015 em termos da taxa crítica da libertação de energia em função da espessura.

4.3- Comparação entre diferentes métodos de tratamento

Após termos analisado o valor de G_{IIc} através do método CBBM, o valor de G_{IIc} através da teoria das vigas também foi determinado. Com o recurso a uma máquina fotográfica digital, foi possível tirar fotografias durante a propagação da fenda no ensaio, para posteriormente determinar o valor de G_{IIc} através da teoria das vigas.

No caso do adesivo AV 138 não foi possível, em virtude de ser um adesivo frágil com uma rotura abrupta.

No caso do adesivo 2015, a situação foi bem diferente, conseguindo observar a propagação da fenda e assim obter valores para a fenda real. Na Tabela 6, estão representados os resultados dos valores de G_{IIc} pelo método da teoria das vigas e comparados com os valores de G_{IIc} obtidos pelo método CBBM.

Tabela 5 – Valores comparativos de G_{IIC} entre os métodos Teoria das vigas e CBBM

Nome do Provete	Teoria das vigas G_{IIC} [N/mm]	Método CBBM G_{IIC} [N/mm]
2015_0.5a	11.25	13.2
2015_1a	12.57	19.2
2015_1b	21.22	32.43

Os valores obtidos na Tabela 6 mostram que a teoria das vigas subestima o valor de G_{IIC} pela dificuldade de medir com precisão o valor de a durante a execução do ensaio.



Figura 411 – Zoom da fotografia do provete 2015_1b

Na Figura 41, é possível ver a dificuldade de visualização da progressão da fenda durante o ensaio ENF.

4.4 - Ensaio ATDCB

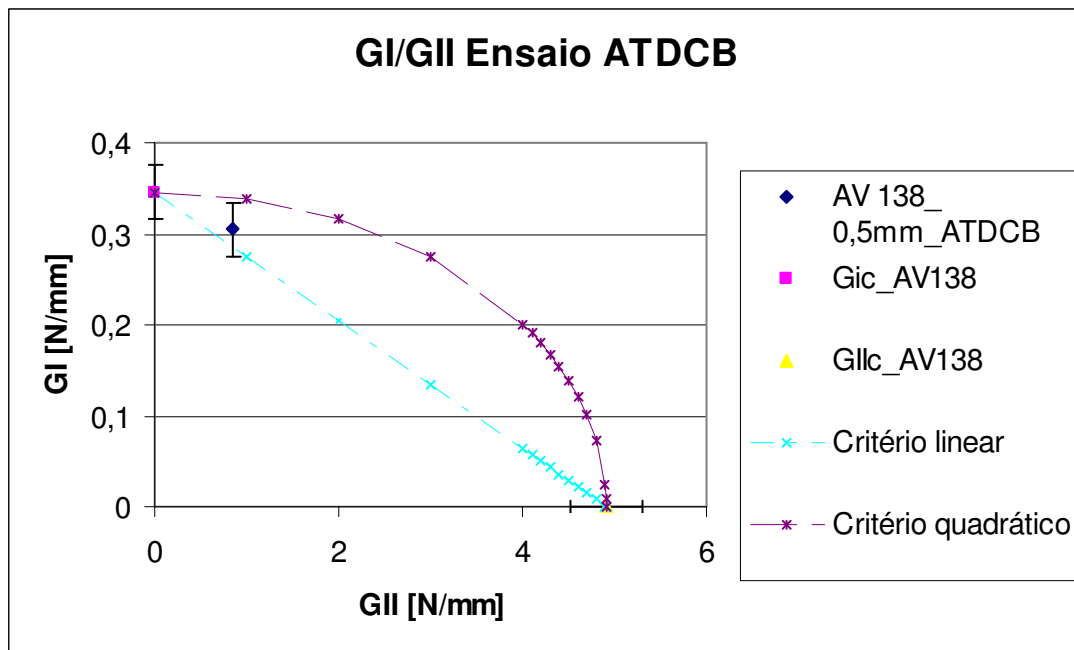


Figura 422- Gráfico do envelope GI/GII para o adesivo AV138 com uma espessura de 0.5mm

A Figura 42 mostra os resultados obtidos no ensaio ATDCB para o adesivo AV138 num gráfico G_I vs G_{II} . Esta figura permite também visualizar os resultados obtidos em modo I e modo II. Os valores de G_{IIc} foram calculados através dos ensaios ENF realizados neste trabalho, enquanto aos valores de G_{Ic} para modo I do adesivo AV 138 foram retirados da literatura [9]. A Figura 42 mostra que o ensaio em modo misto do adesivo AV138 com 0,5mm de espessura esta mais próximo da curva de critério linear. Por outro lado, o valor da taxa da libertação de energia em modo misto aproxima-se mais do valor de G_{Ic} do que do valor G_{IIc} para este tipo de mixicidade.

Na Figura 43 estão representadas as roturas coesivas do adesivo AV138 para o ensaio ATDCB.



Figura 43 – Roturas coesivas do adesivo AV138 para o ensaio ATDCB

5 – Conclusão

A taxa crítica de libertação de energia para o adesivo AV138 mantém-se constante para as diferentes espessuras. Este fenómeno ocorre em virtude do AV 138 ser um adesivo frágil, com uma rotura abrupta, que não desenvolve fenómenos de plasticidade na fenda, não sendo afectado pela FPZ.

O adesivo 2015, é um adesivo mais dúctil do que o AV138, como foi possível comprovar pelo seu comportamento nas curvas P- δ . Verificou-se que a taxa crítica de libertação de energia aumenta linearmente com o aumento da espessura de junta. Sendo o adesivo 2015 um adesivo dúctil, desenvolve uma componente FPZ na extremidade da fenda que é afectada quando a espessura varia.

O adesivo 2015 é aquele que tem a melhor força de rotura e melhor taxa crítica de libertação de energia, sendo o que apresenta melhor combinação de resistência mecânica e ductilidade.

Para o ensaio misto ATDCB do adesivo AV 138 com 0,5mm de espessura, a taxa crítica da libertação de energia em modo misto aproxima-se mais do valor de G_{Ic} do que do valor G_{IIc} , para este tipo de mixicidade.

6 – Bibliografia

1. "Adhesives and Sealants, General Knowledge, Application Techniques, New Curing Techniques", Series Editor Philippe Cognard, Elsevier, (2006)
2. L. F. M. da Silva, A. G. Magalhães, M. F. Moura, "Juntas Adesivas Estruturais", Publindústria, Porto (2007).
3. X. Zhao, R. D. Adams, L. F. M. da Silva, "Single Lap Joints with radiused adherend corners; Experimental results and strength prediction", J. Adhesion Sci. Technol., submetido (2010).
4. M.F.S.F. De Moura, "Numerical simulation of the ENF test for the mode II fracture characterization of bonded joints", J. Adhesion Sci. Technol. Vol. 20, Nº 1, pp. 37-52 (2006)
5. M.A.L. Silva, M.F.S.F. De Moura, J.J.L. Morais, A.B. De Morais, "Estudo por elementos finitos do provete End Loaded Split (ELS), para a determinação experimental de G_{IIc} na espécie de madeira *Pinus Pinaster*" Revista Mecânica Experimental, n.º12, pp. 42-48 (2002).
6. M.F.S.F. De Moura, A.B. De Morais, "Equivalent crack based analysed of ENF and ELS test", Engineering Fracture Mechanics Vol.75, pp. 2584-2596 (2008).
7. M.F.S.F De Moura, J.P.M Gonçalves, J.A.G. Chousal, R.D.S. Campilho, "Cohesive and Continuum Mixed-mode damage models applied to the simulation of the mechanical behavior of bonded joints", International Journal of Adhesion & Adhesives Vol. 28, pp. 419-426 (2008).
8. Soojae Park, D.A. Dillard, "Development of a simple mixed-mode fracture test and the resulting fracture energy envelope for an adhesive bond", Int. J. Fract. Vol. 148, pp. 261-271 (2007)
9. R. J. C. Carbas, "Estudo paramétrico de juntas adesivas pelo método Taguchi", Relatório do Projecto Final do MIEM (2008).

7 – Anexos

7.1 – Gráficos obtidos do ensaio ENF para o adesivo AV138

Provetes com 0.2mm de espessura

Nome do provete: ENF_ 0.2_138 a

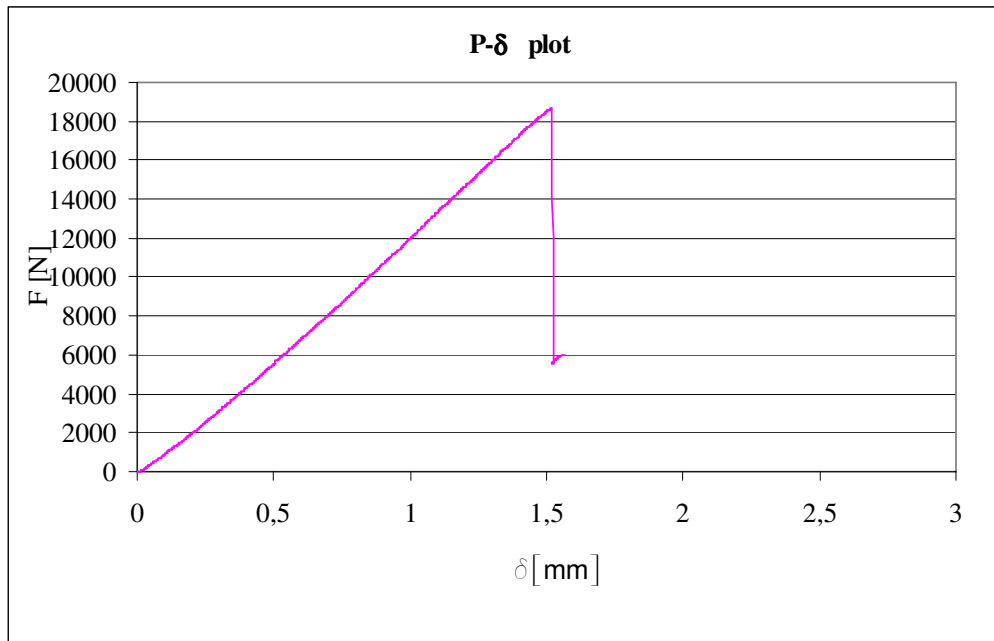


Figura 444 – Curva P- δ para o adesivo AV 138 com 0.2mm de espessura

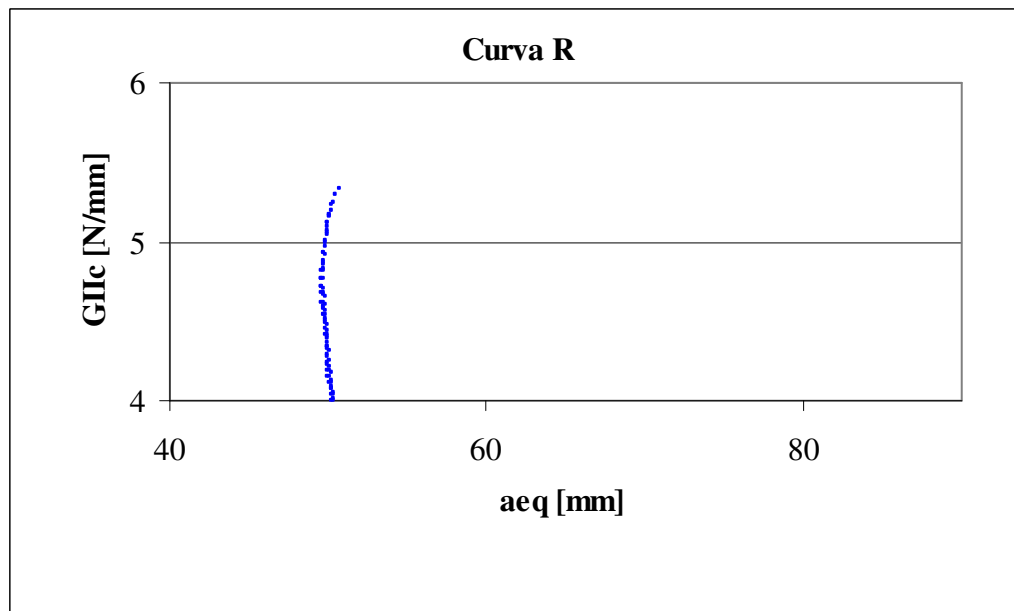


Figura 455 – Curva R para o adesivo Av 138 com 0.2mm

Nome do Provete: ENF_0.2_138b

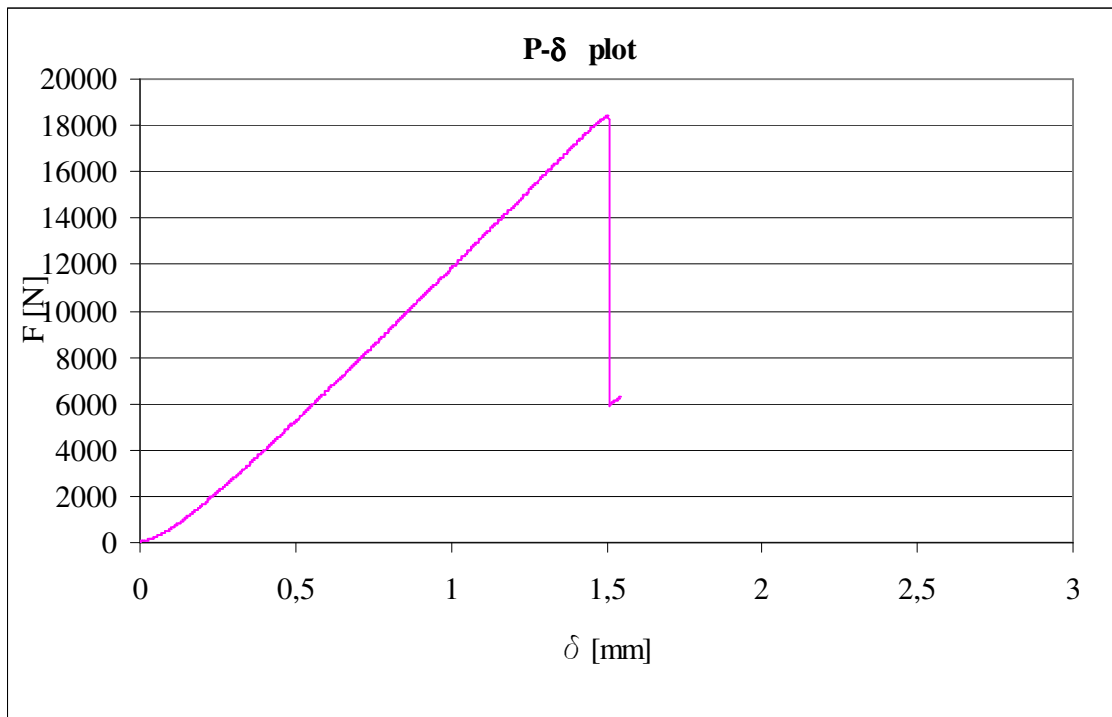


Figura 466 - Curva P- δ para o adesivo AV 138 com 0.2mm de espessura

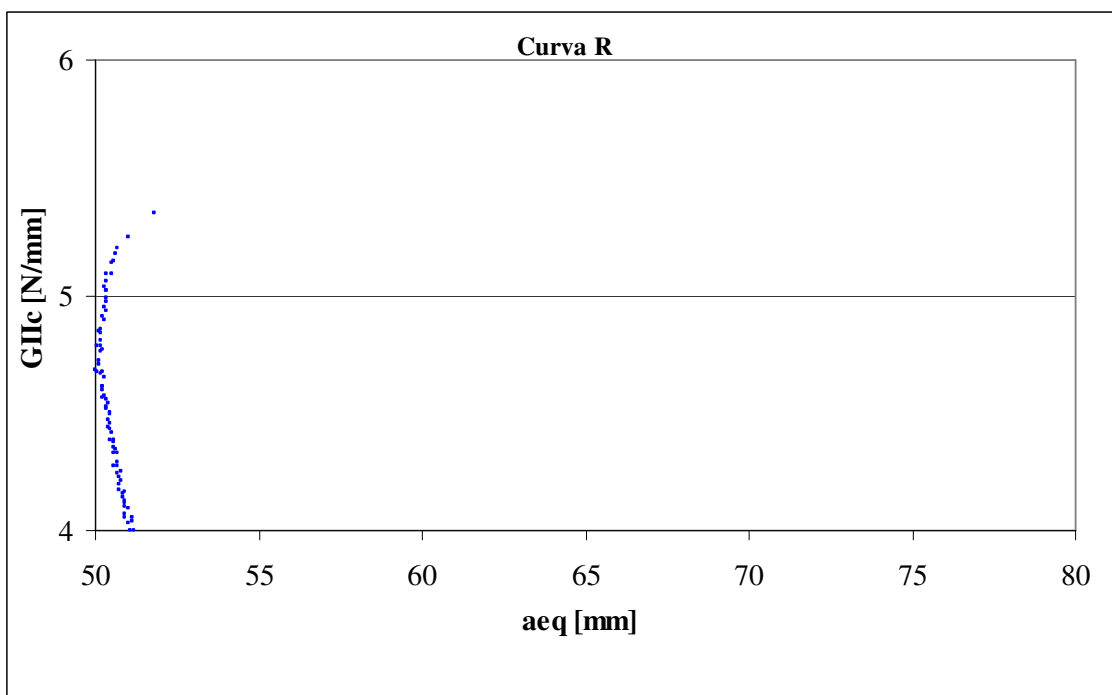


Figura 477 - Curva R para o adesivo Av 138 com 0.2mm

Provetes com espessura de 0.5mm

Nome do provete: ENF_0.5_138a

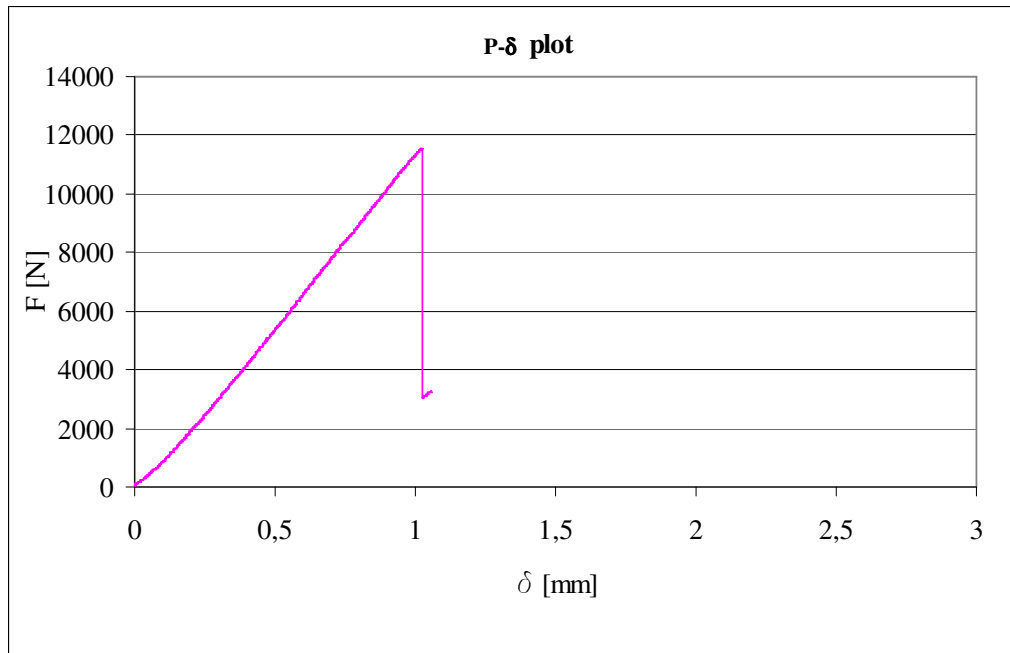


Figura 488 - Curva P- δ para o adesivo AV 138 com 0.5mm de espessura

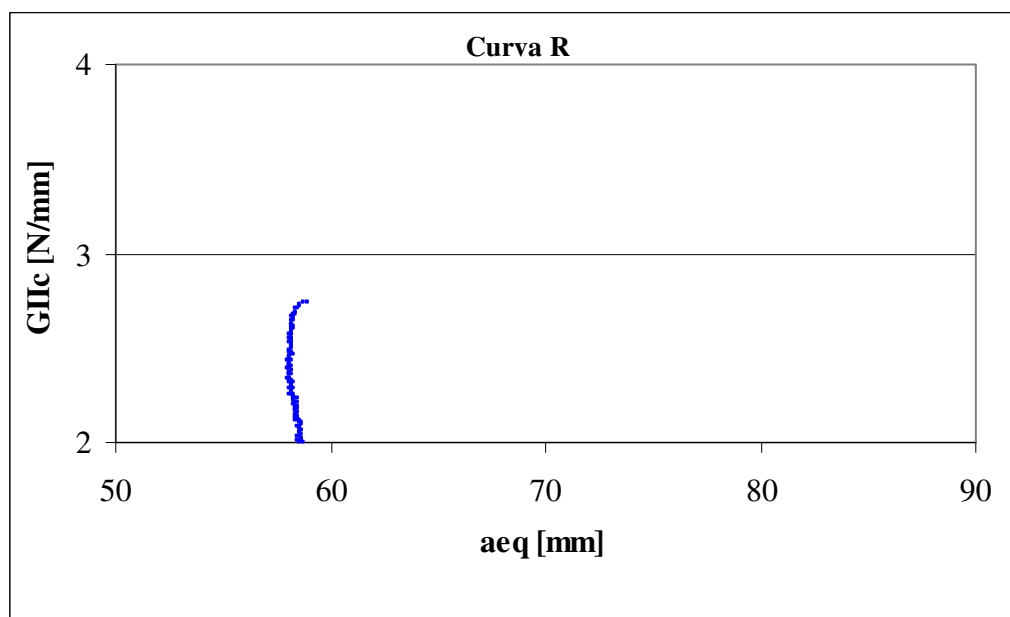


Figura 4949 - Curva R para o adesivo Av 138 com 0.5mm

Nome do provete: ENF_0.5_138b

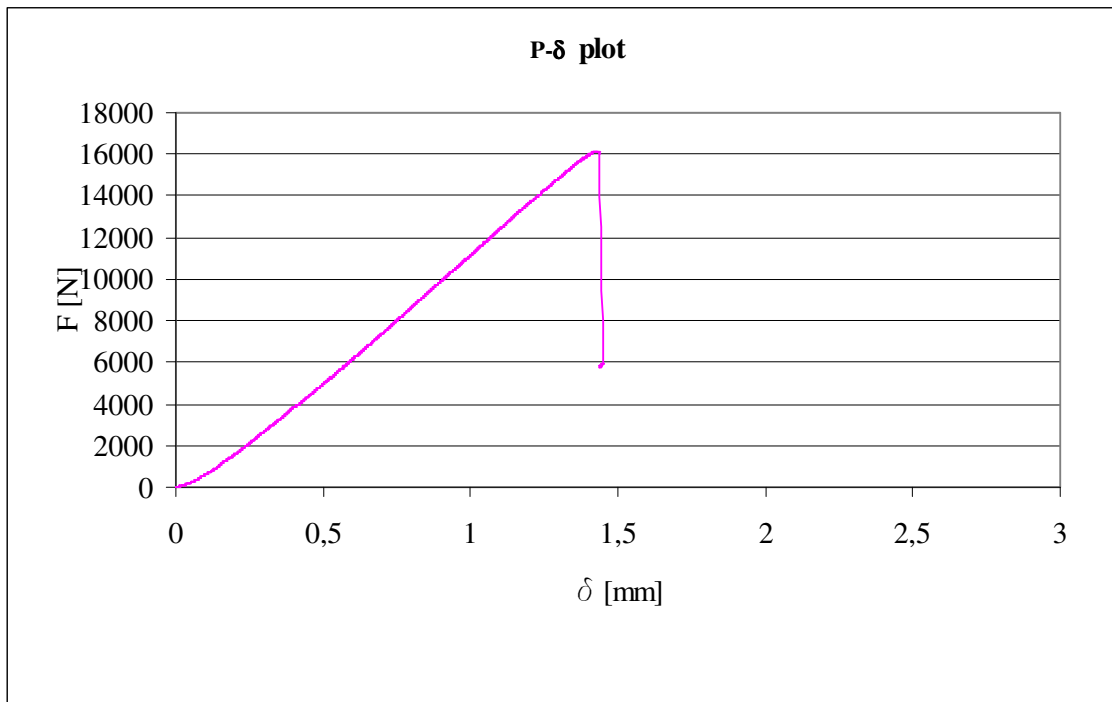


Figura 500 - Curva P- δ para o adesivo AV 138 com 0.5mm de espessura

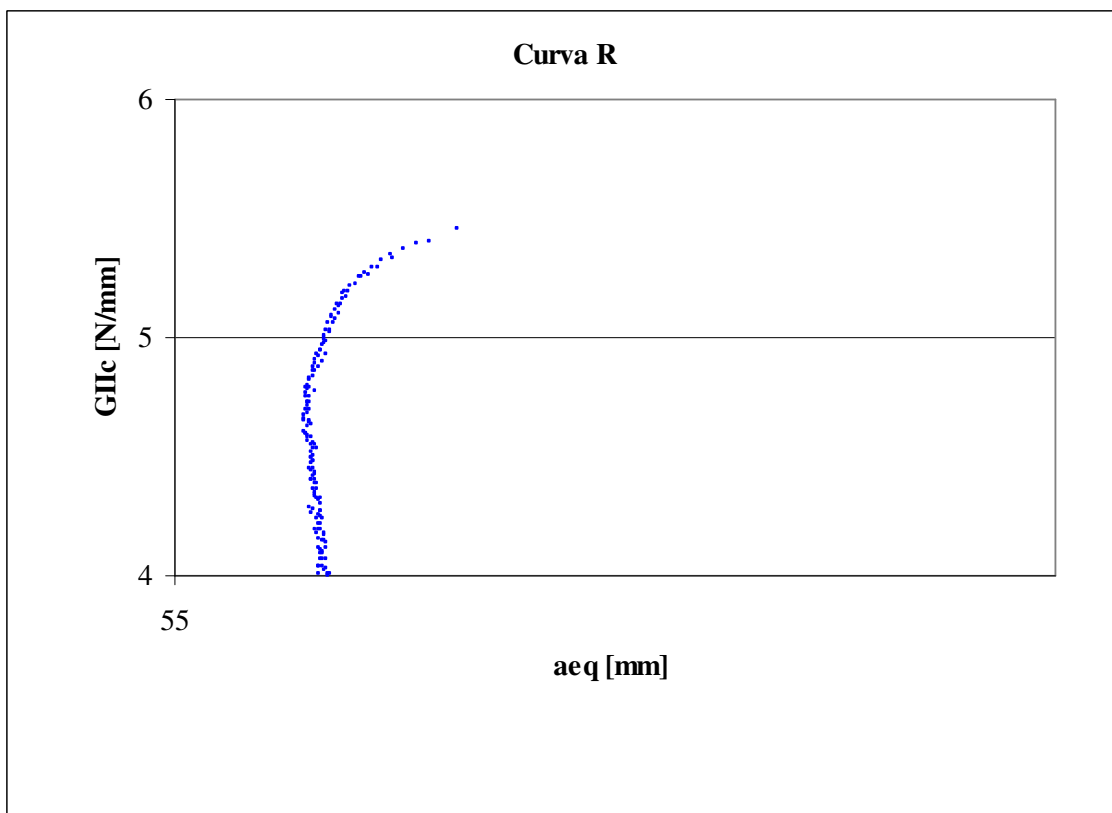


Figura 51 - Curva R para o adesivo Av 138 com 0.5mm

Nome do provete: ENF_0.5_138c

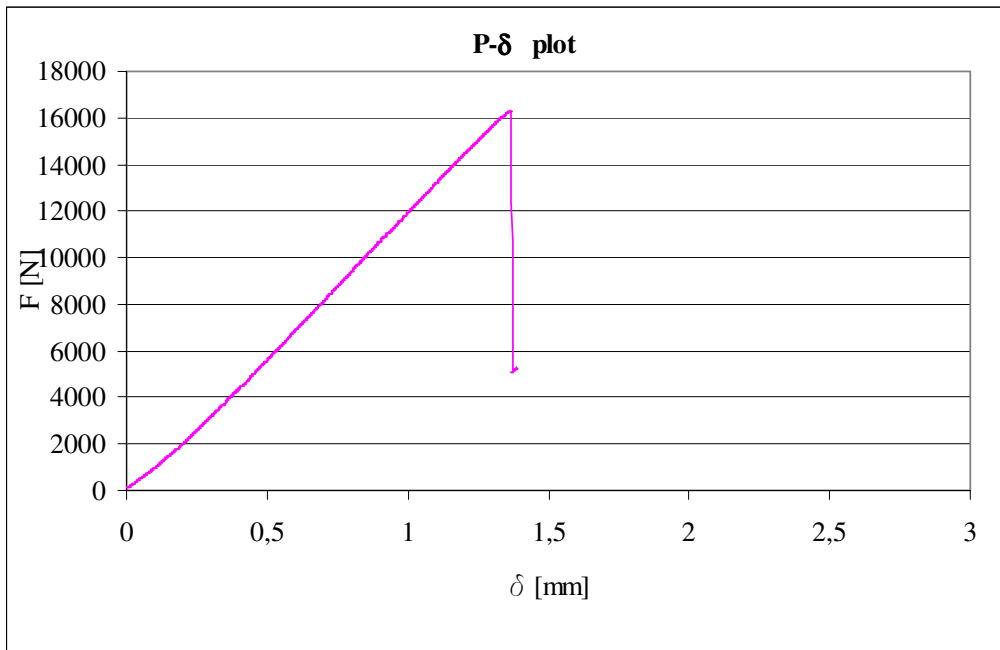


Figura 52 - Curva P-δ para o adesivo AV 138 com 0.5mm de espessura

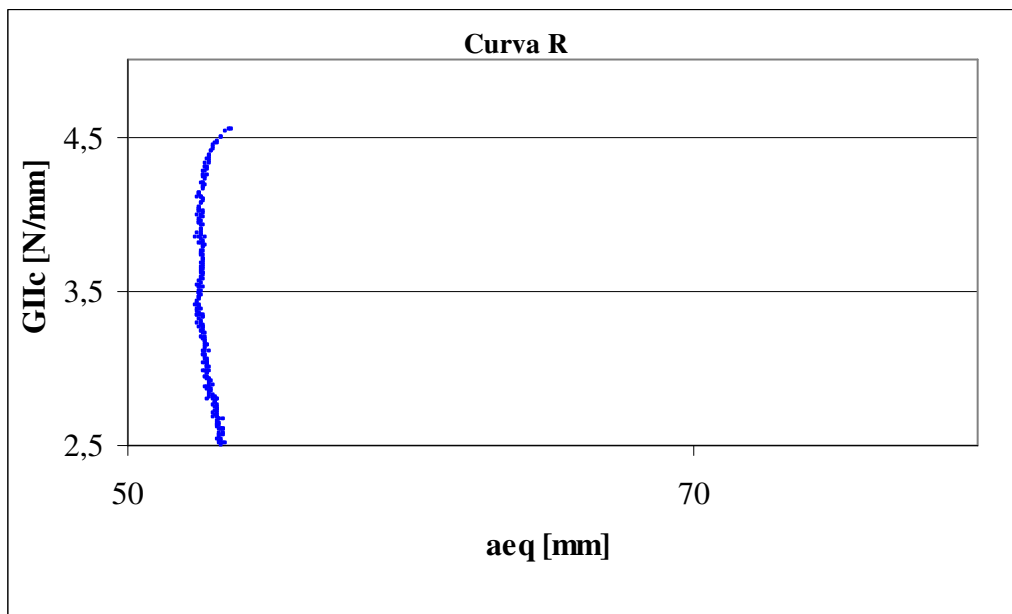


Figura 523 - Curva R para o adesivo Av 138 com 0.5mm

Provetes com espessura de 1mm

Nome do Proвете: ENF_1_138a

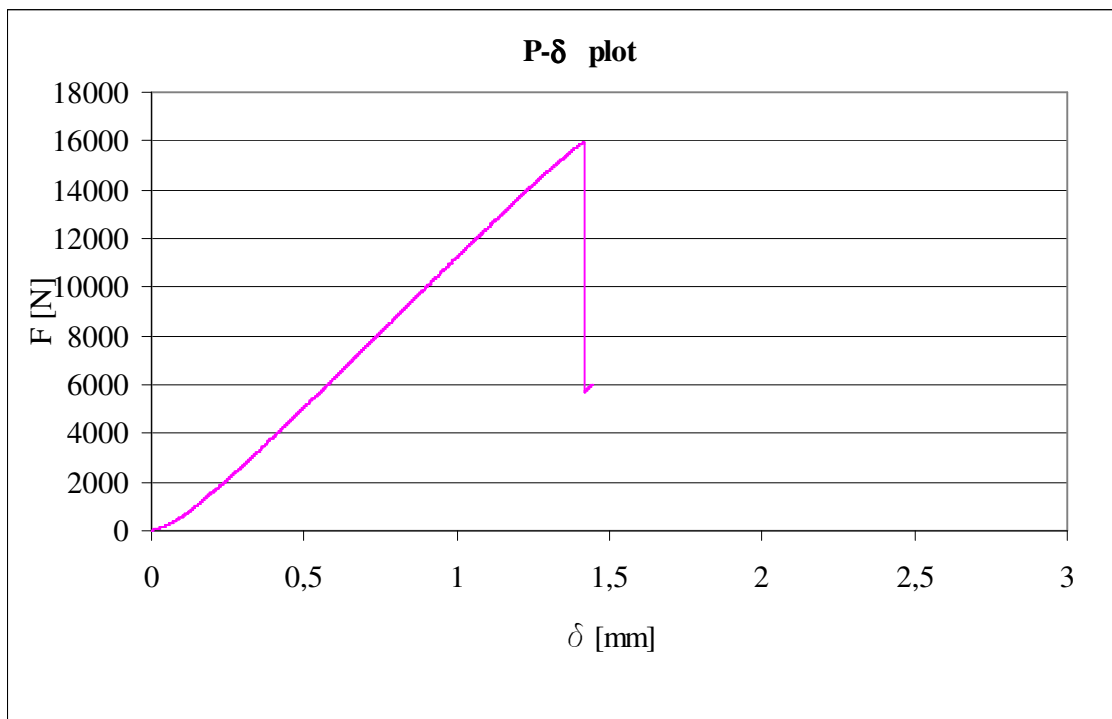


Figura 534 - Curva P- δ para o adesivo AV 138 com 1mm de espessura

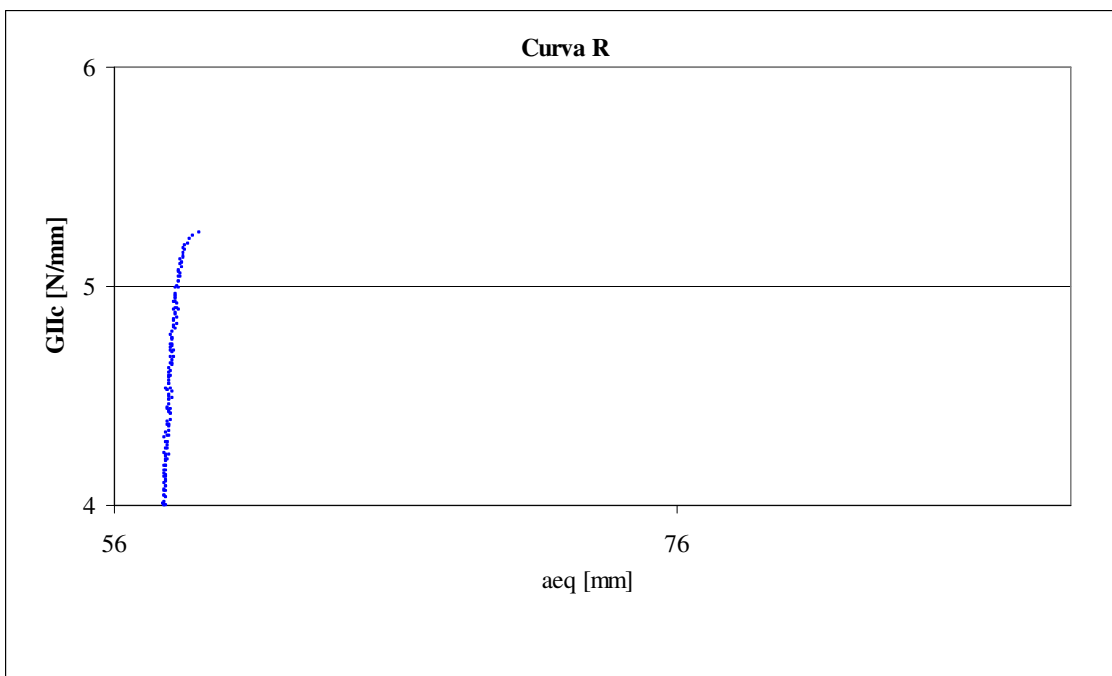


Figura 545 - Curva R para o adesivo Av 138 com 1mm

Nome do provete: ENF_1_138b

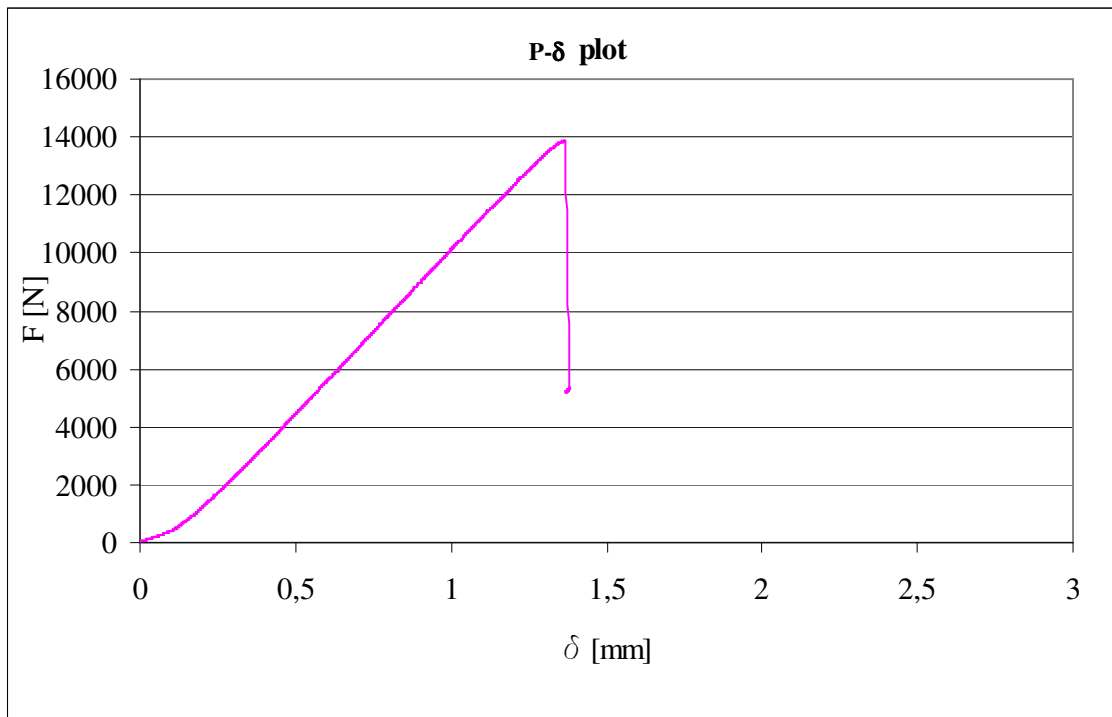


Figura 556 - Curva P- δ para o adesivo AV 138 com 1mm de espessura

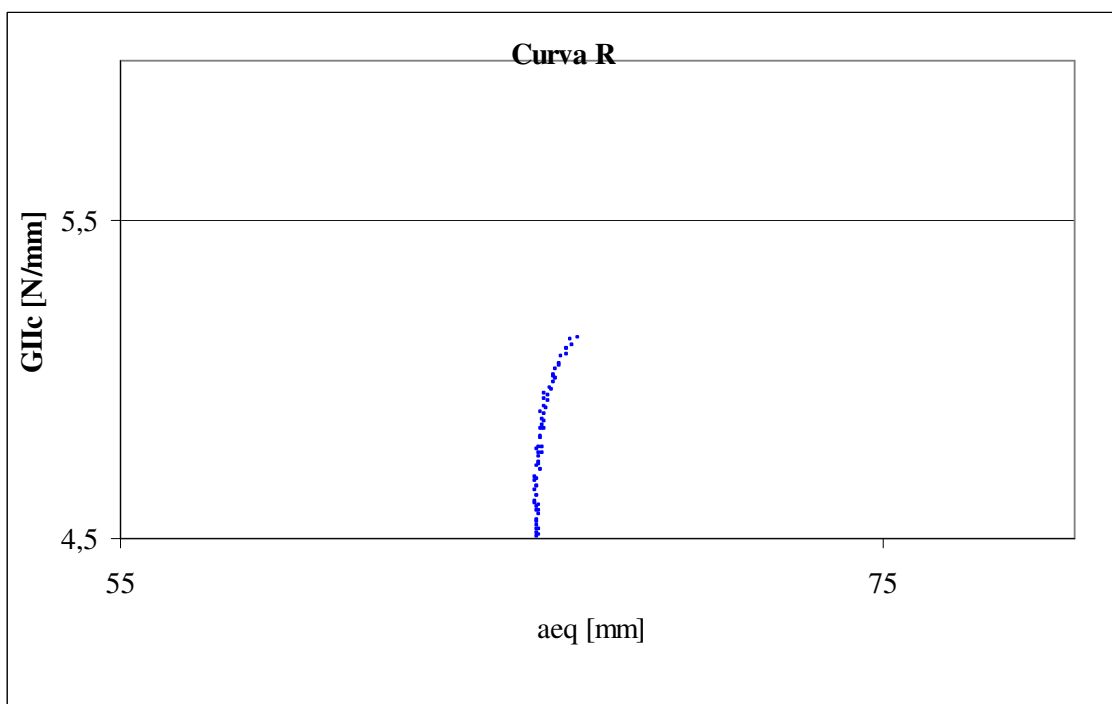


Figura 567 - Curva R para o adesivo Av 138 com 1mm

Nome do provete: ENF_1_138c

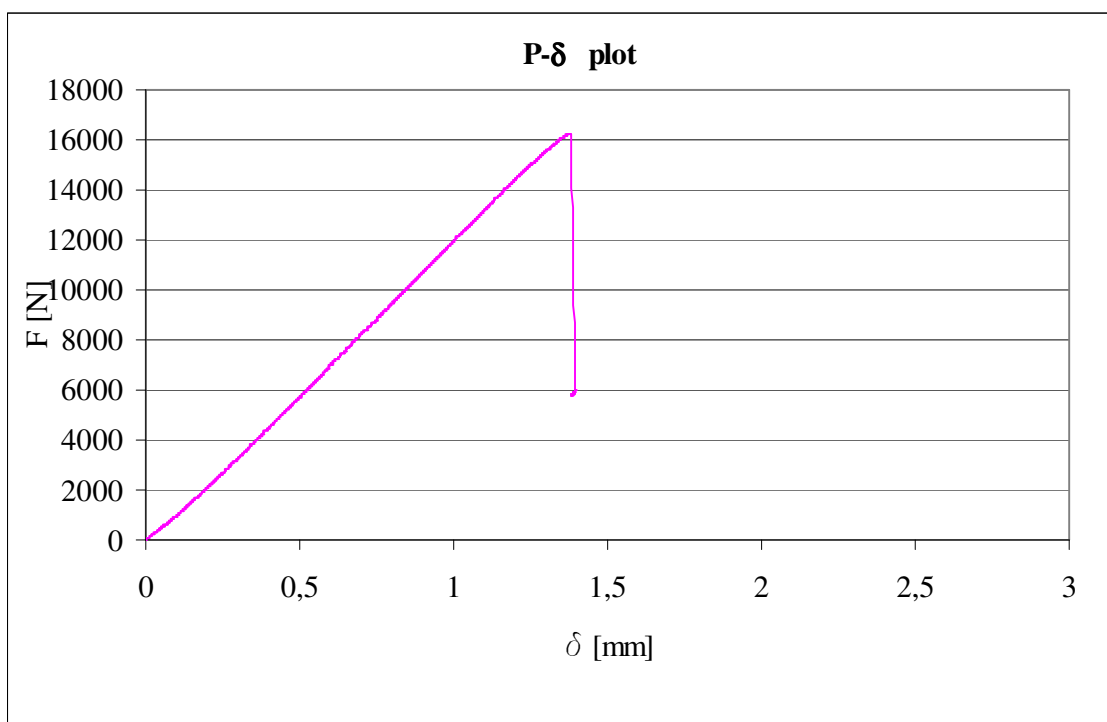


Figura 57 – Curva P- δ para o adesivo AV 138 com 1mm de espessura

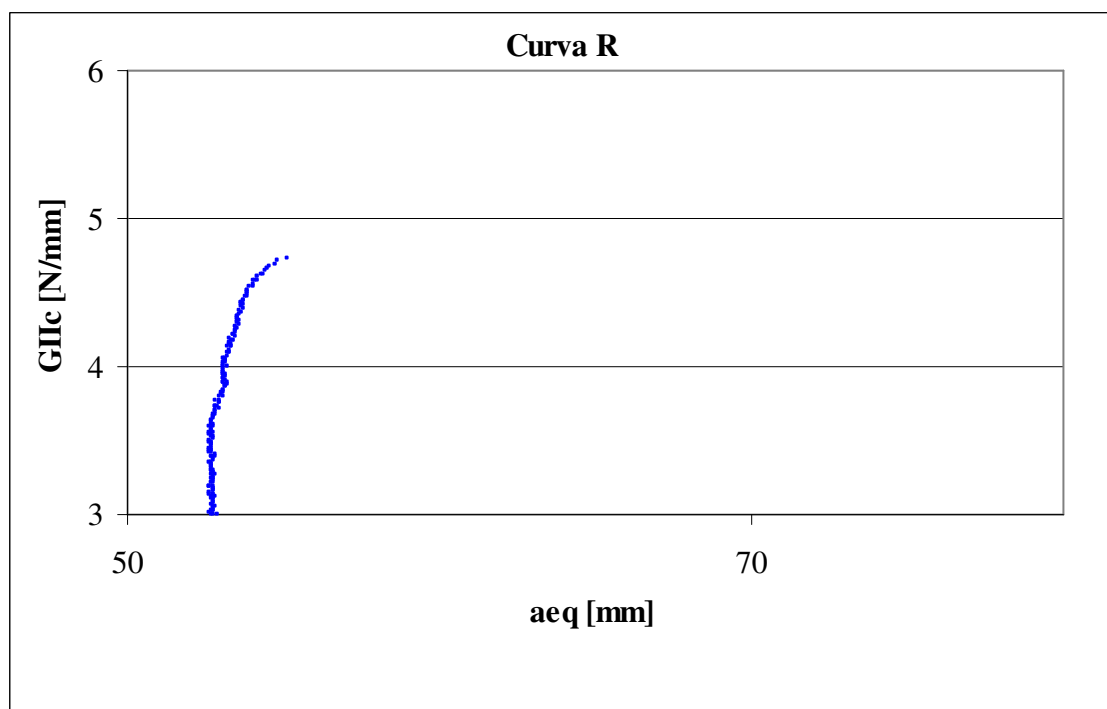


Figura 5958 - Curva R para o adesivo Av 138 com 1mm

7.2 – Gráficos óbtidos do ensaio ENF para o adesivo 2015

Provetes com 0.2mm de espessura

Nome do provete: ENF_0.2_2015 a

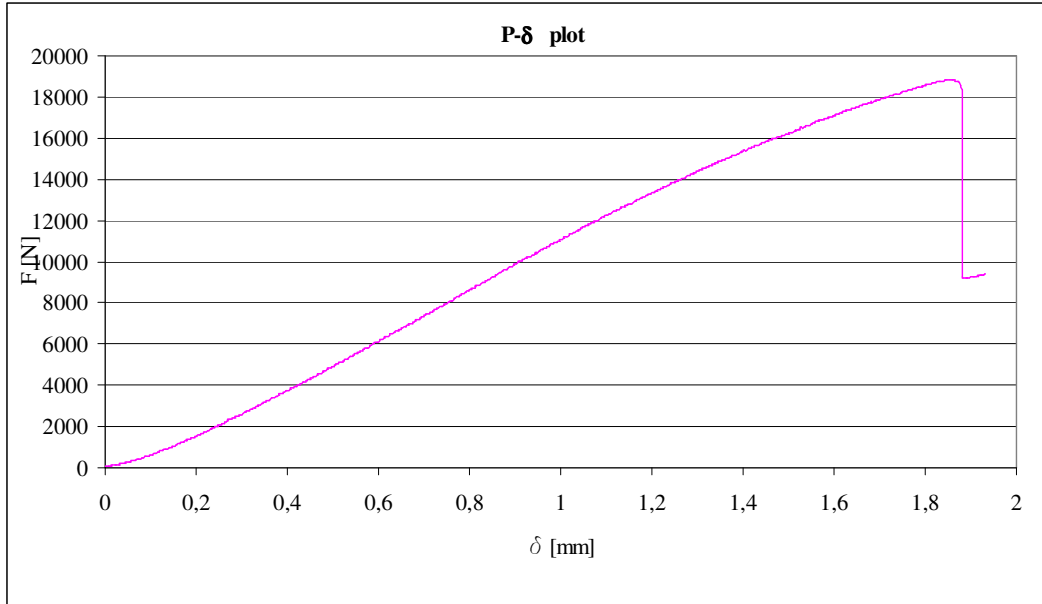


Figura 590 - Curva P- δ para o adesivo 2015 com 0.2mm de espessura

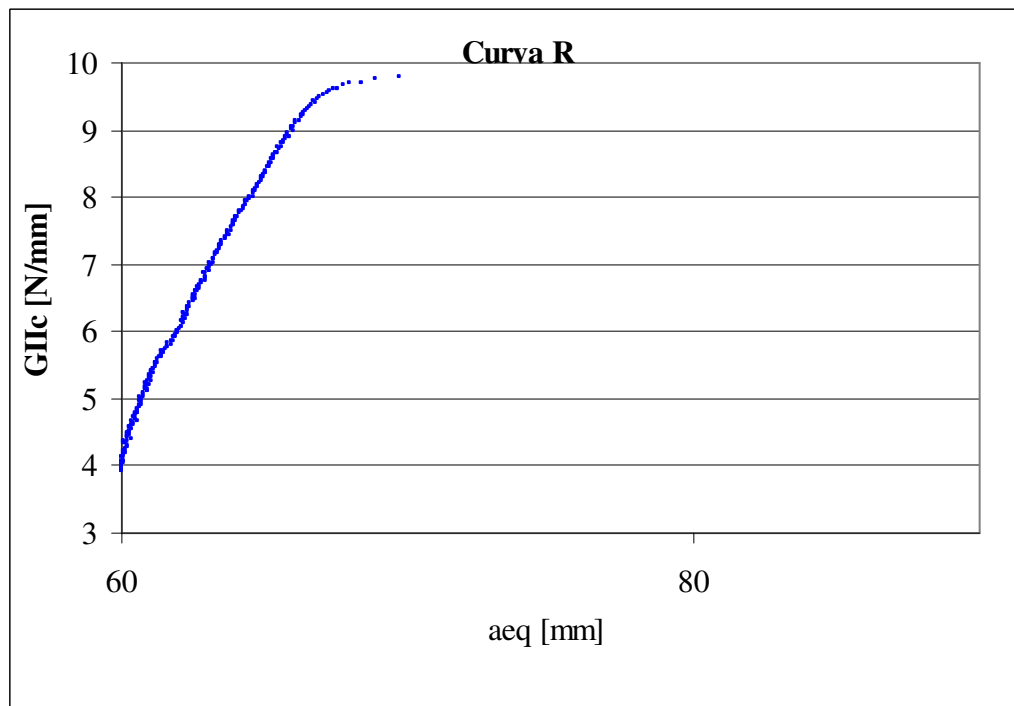


Figura 601 - Curva R para o adesivo 2015 com 0.2mm

Nome do provete: ENF_0.2_2015b

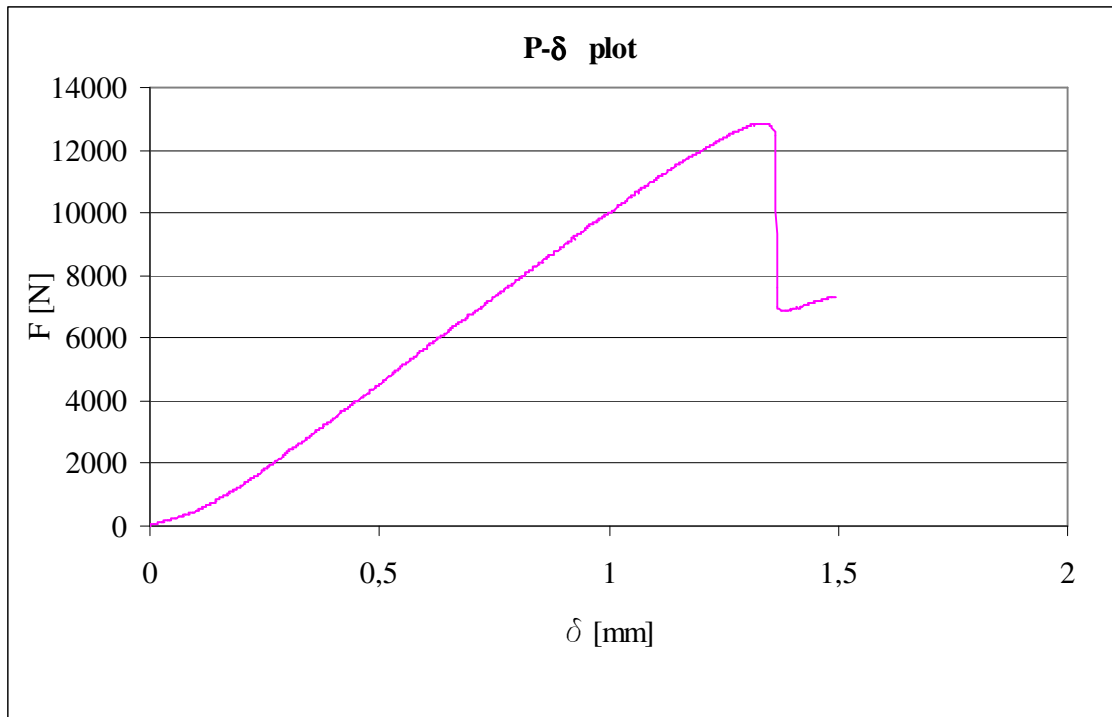


Figura 612 - Curva P- δ para o adesivo 2015 com 0.2mm de espessura

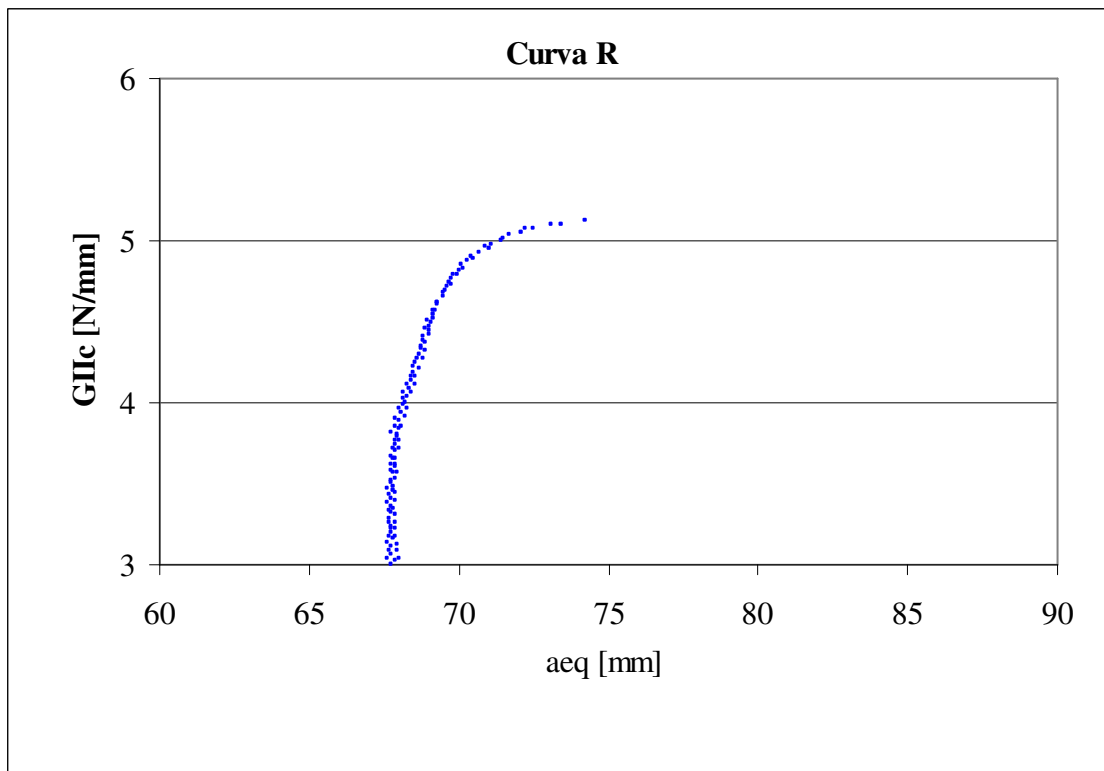


Figura 623 - Curva R para o adesivo 2015 com 0.2mm

Nome do provete: ENF_0.2_2015c

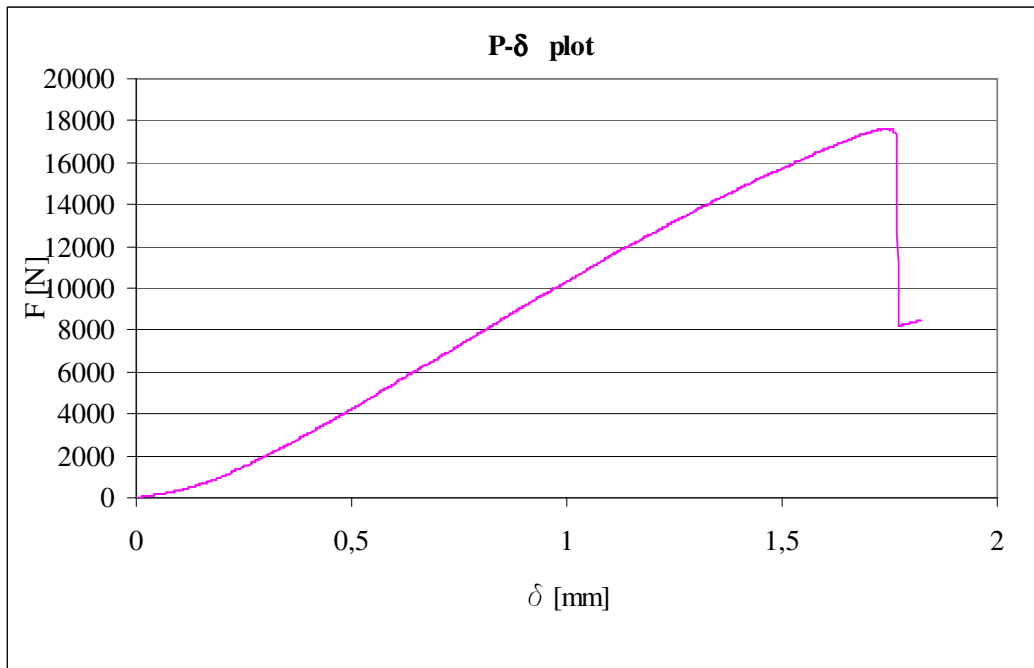


Figura 634 - Curva P- δ para o adesivo 2015 com 0.2mm de espessura

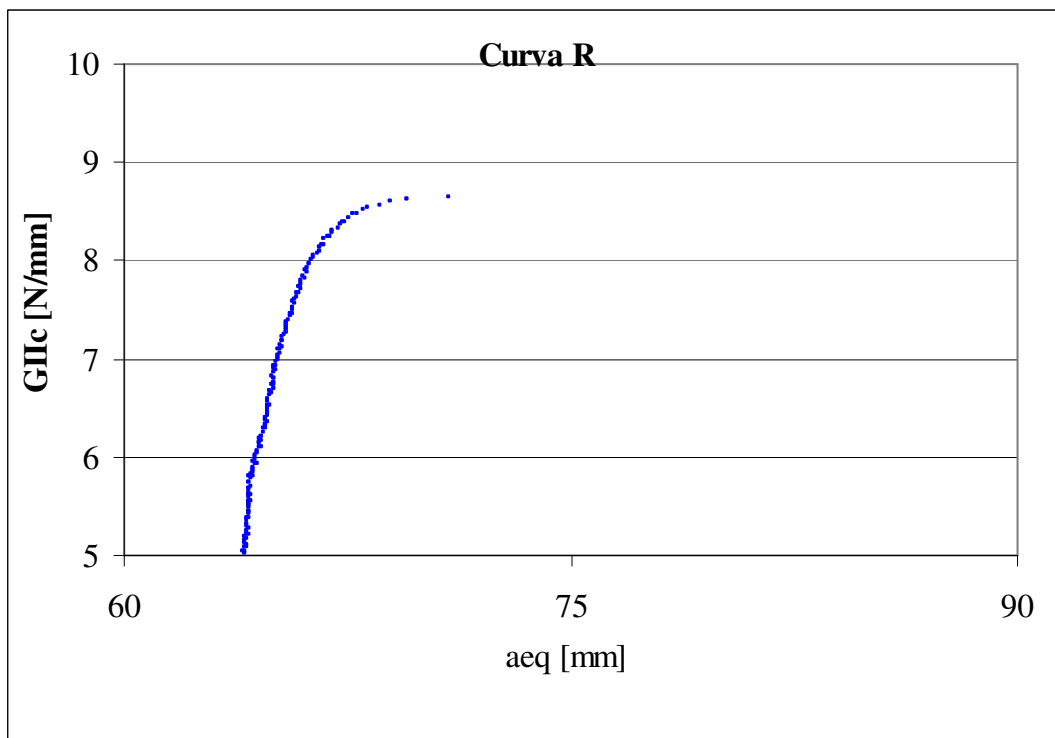


Figura 645 - Curva R para o adesivo 2015 com 0.2mm

Nome do provete: ENF_0.2_2015d

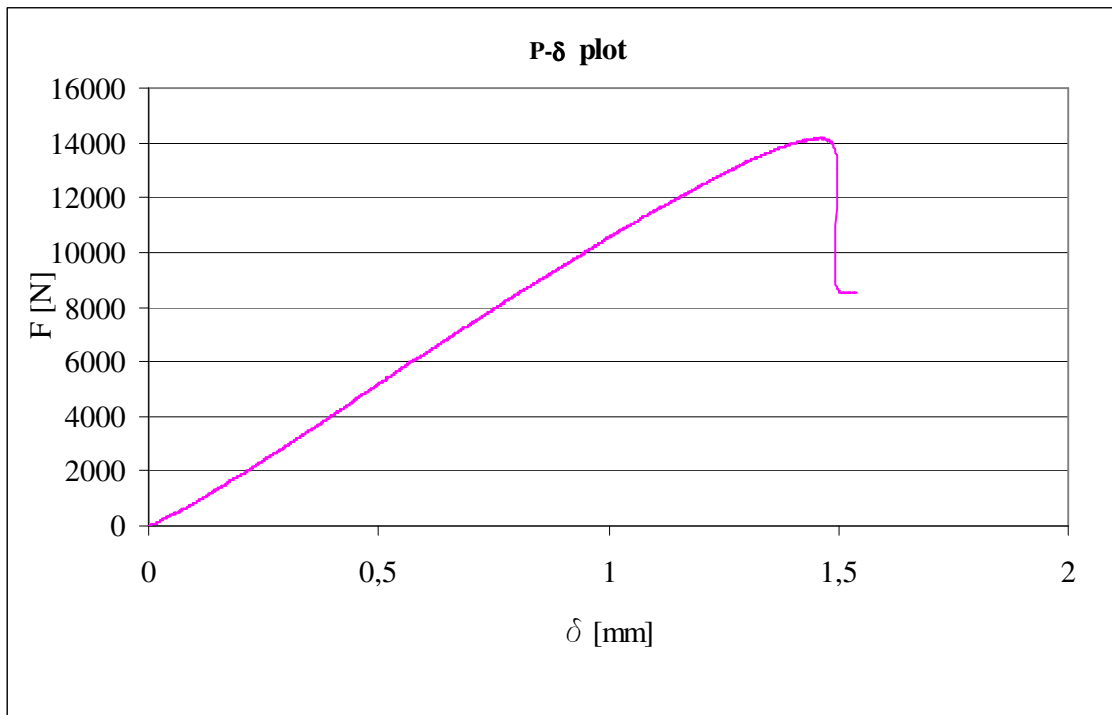


Figura 65 - Curva P- δ para o adesivo 2015 com 0.2mm de espessura

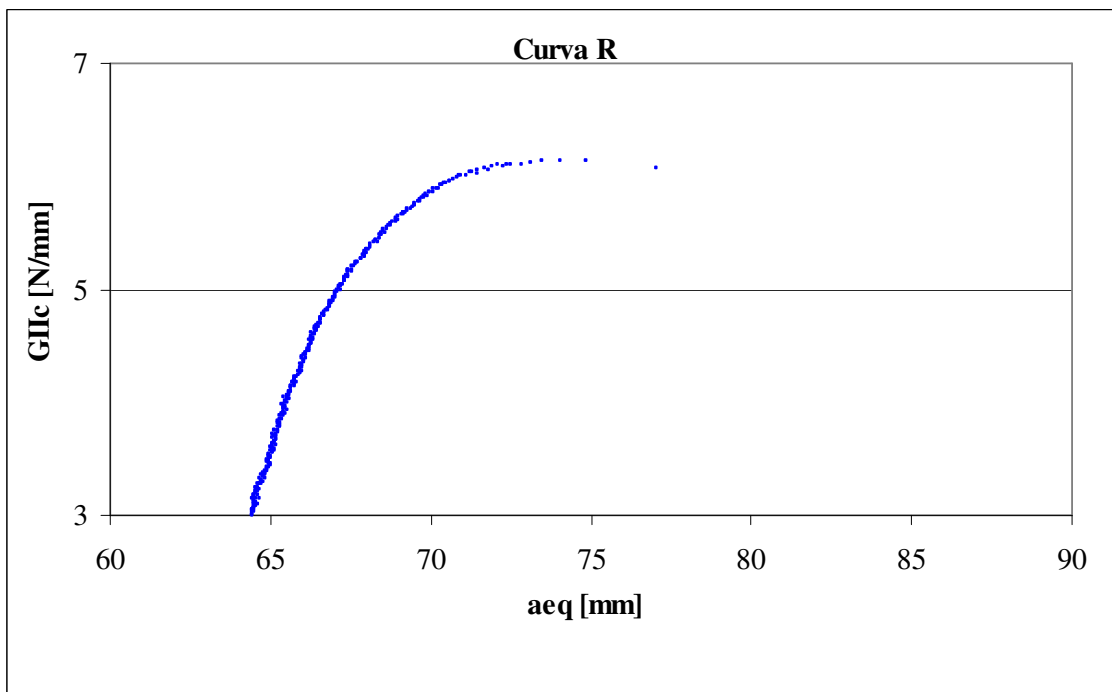


Figura 667 - Curva R para o adesivo 2015 com 0.2mm

Provetes com 0.5mm de espessura

Nome do provete:ENF_0.5_2015a

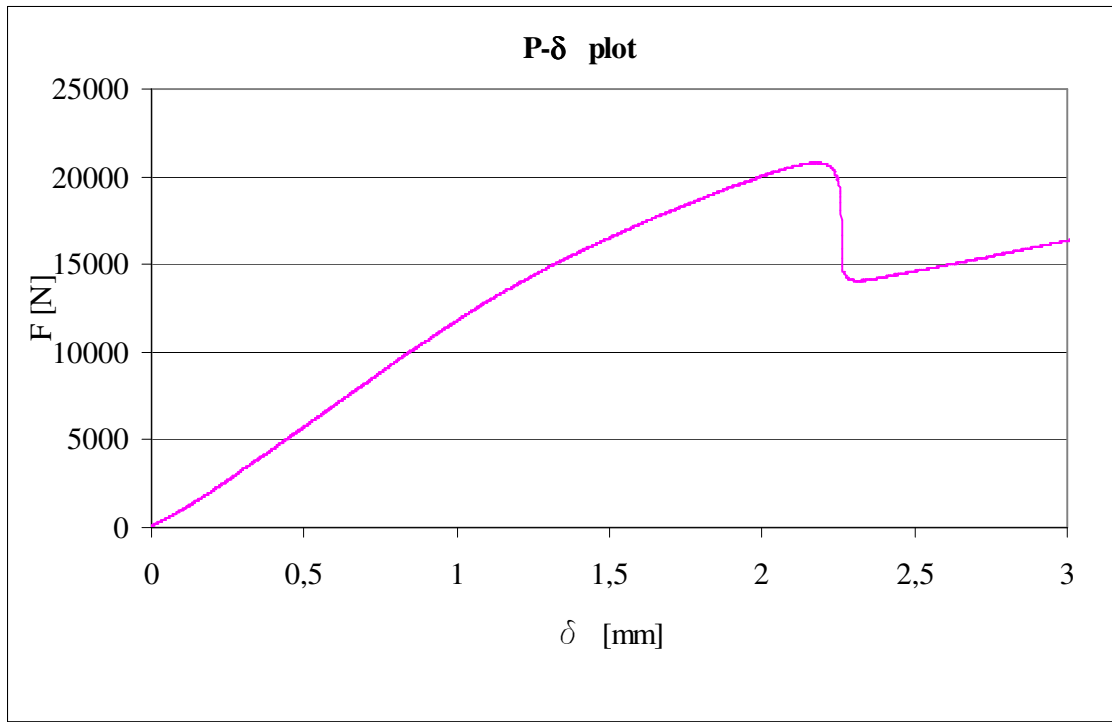


Figura 678- Curva P- δ para o adesivo 2015 com 0.5mm de espessura

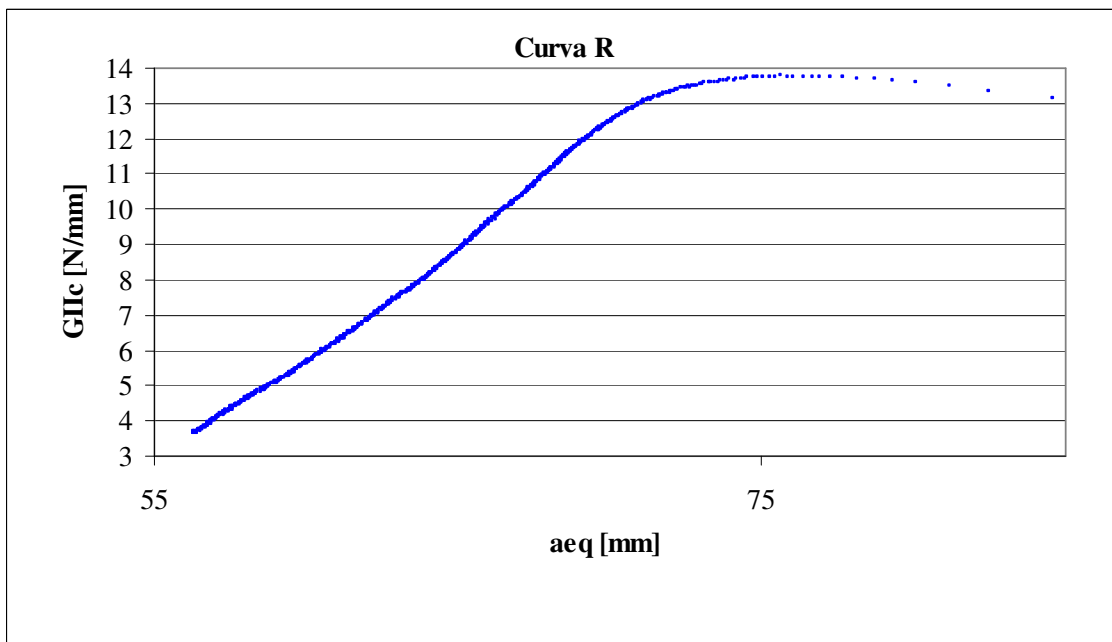


Figura 6968 - Curva R para o adesivo 2015 com 0.5mm

Nome do provete: ENF_0.5_2015b

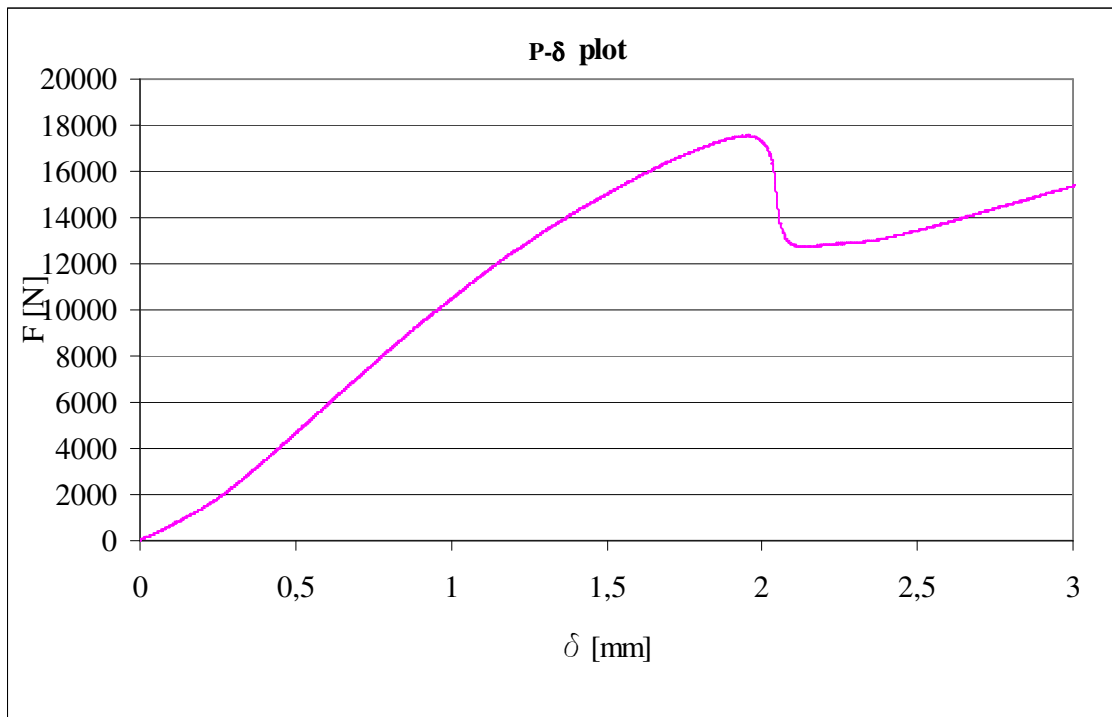


Figura 690 - Curva P- δ para o adesivo 2015 com 0.5mm de espessura

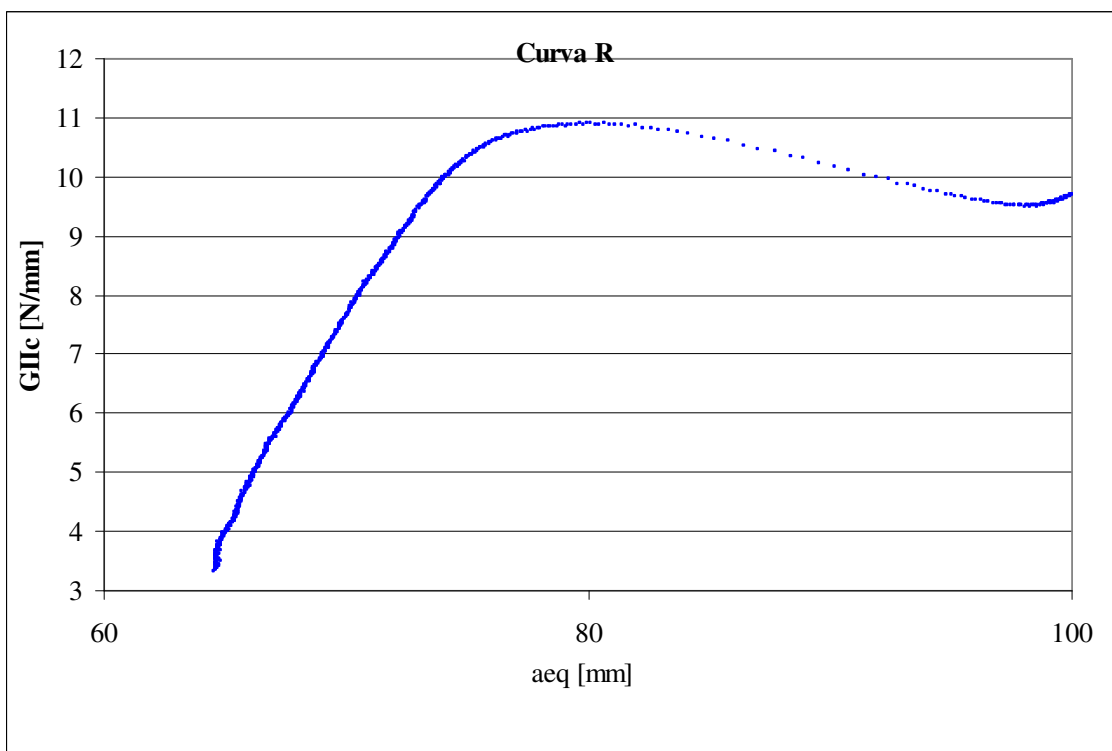


Figura 701 - Curva R para o adesivo 2015 com 0.5mm

Provetes com 1mm de espessura

Nome do provete: ENF_1_2015a

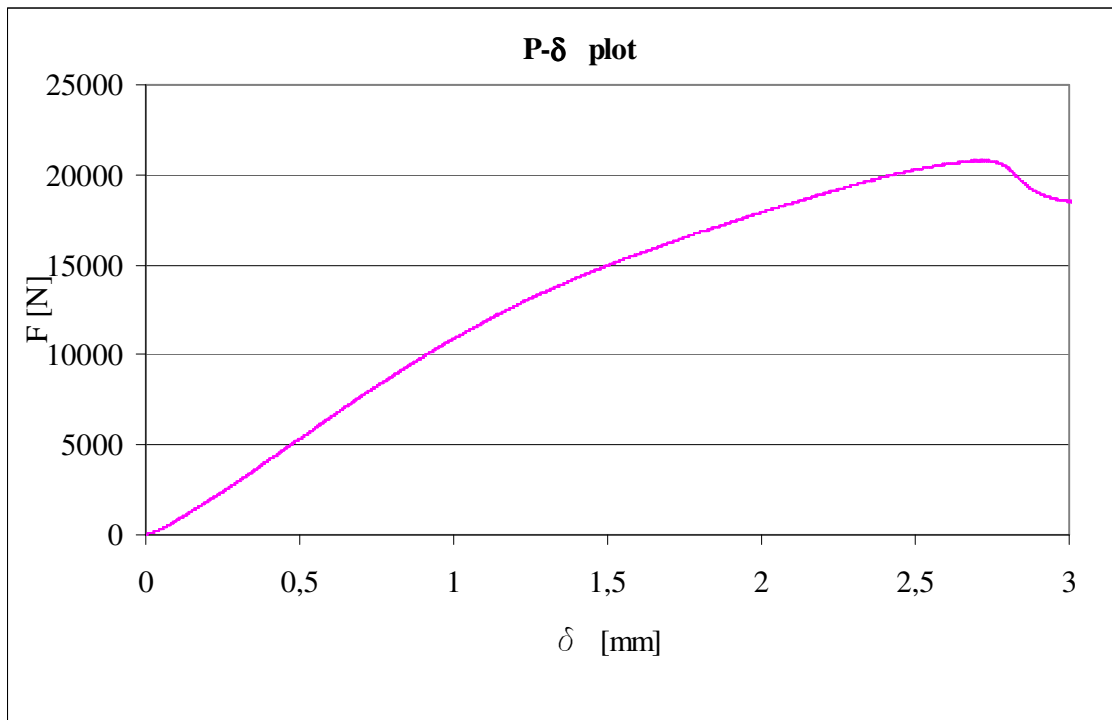


Figura 712 - Curva P- δ para o adesivo 2015 com 1mm de espessura

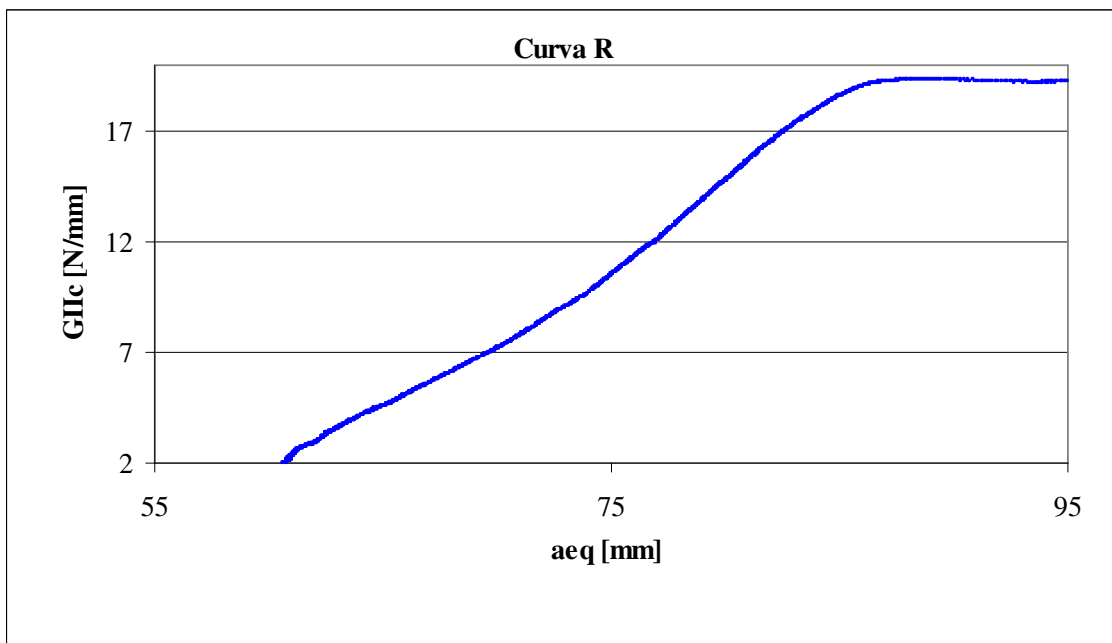


Figura 723 - Curva R para o adesivo 2015 com 1mm

Nome do provete: ENF_1_2015b

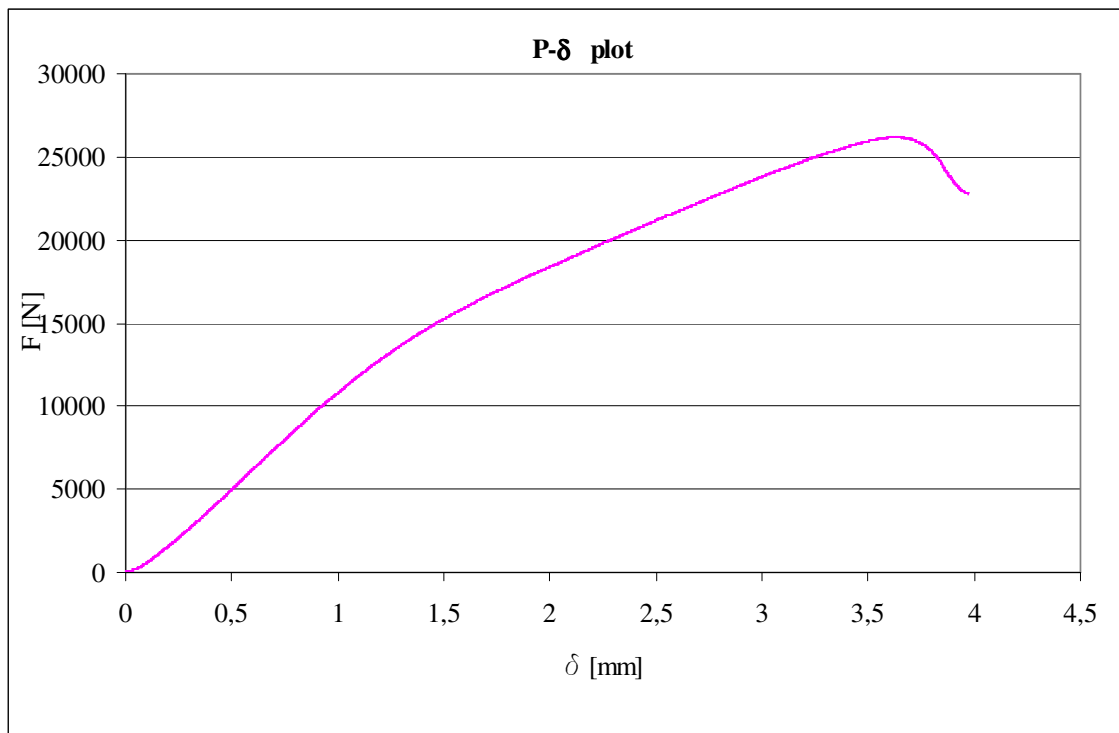


Figura 734 - Curva P- δ para o adesivo 2015 com 1mm de espessura

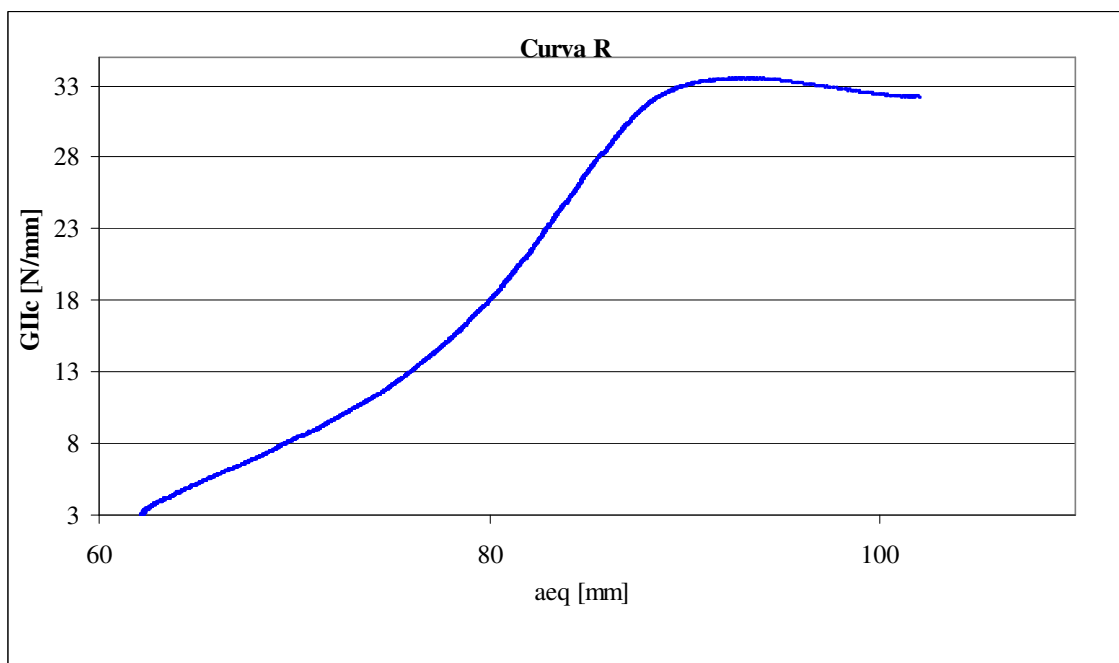


Figura 745 - Curva R para o adesivo 2015 com 1mm

Nome do provete: ENF_1_2015c

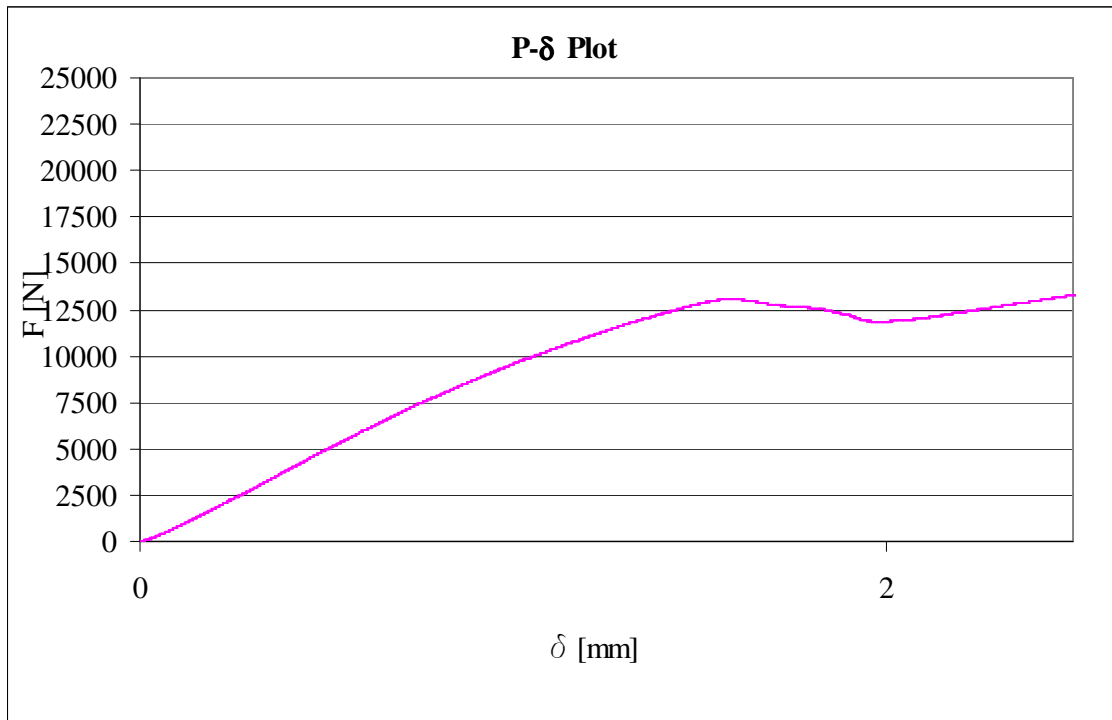


Figura 756 - Curva P- δ para o adesivo 2015 com 1mm de espessura

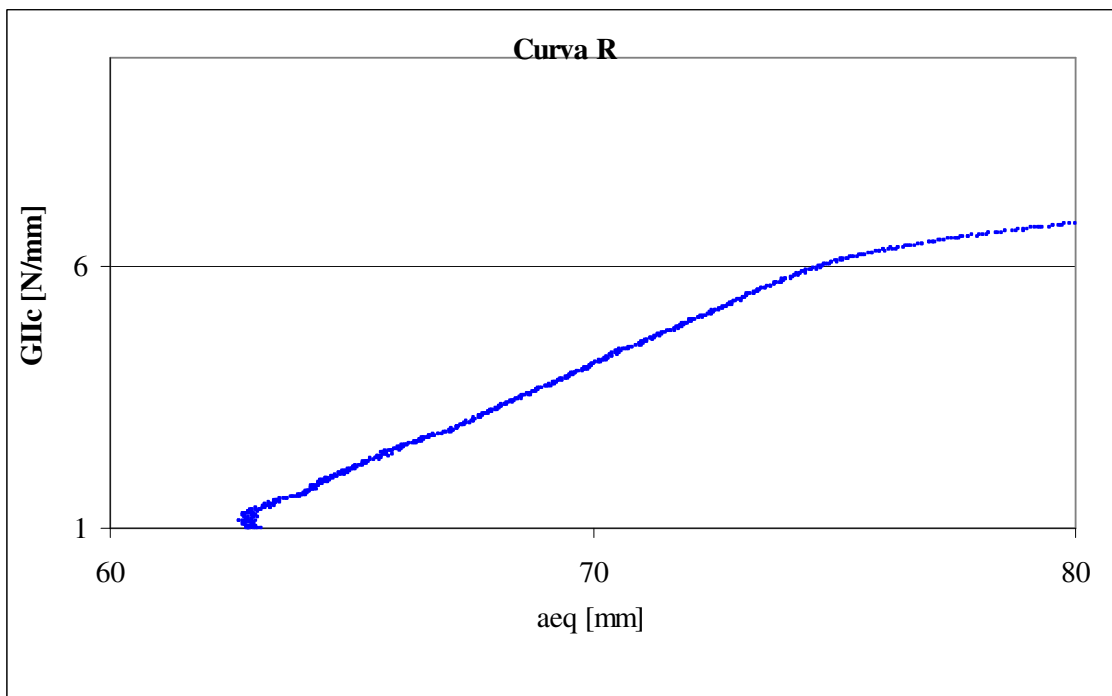


Figura 767 - Curva R para o adesivo 2015 com 1mm

