



# LIGAÇÃO SOLDADA DE COMPOSITOS DE FIBRA DE VIDRO E POLIPROPILENO

**RAFAEL ALEXANDRE NUNES DE SOUSA**

Outubro de 2016

# LIGAÇÃO SOLDADA DE COMPOSITOS DE FIBRA DE VIDRO E POLIPROPILENO

Rafael Alexandre Nunes de Sousa

**2016**

Instituto Superior de Engenharia do Porto  
Departamento de Engenharia Mecânica



# LIGAÇÃO SOLDADA DE COMPOSITOS DE FIBRA DE VIDRO E POLIPROPILENO

Rafael Alexandre Nunes de Sousa  
1091083

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Professor Doutor João Francisco Machado Gomes da Silva e coorientação do Professor Doutor Arnaldo Manuel Guedes Pinto

**2016**

Instituto Superior de Engenharia do Porto  
Engenharia Mecânica



# JÚRI

## **Presidente**

---

---

## **Orientador**

Professor Doutor João Francisco Machado Gomes da Silva  
Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

## **Coorientador**

Professor Doutor Arnaldo Manuel Guedes Pinto  
Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

## **Arguente**

---

---



*As doutrinas apresentadas são da exclusiva responsabilidade do autor e todos os trabalhos consultados e citados no texto constam na bibliografia incluída neste trabalho*



## RESUMO

O crescimento no consumo de materiais compósitos denota a procura incessante de materiais e metodologias cada vez mais eficientes e sustentáveis na indústria. Nesta busca, os compósitos de matriz polimérica apresentam propriedades físicas elevadas ao nível da resistência mecânica, química e física, aliadas a um peso reduzido. Isto torna-os particularmente interessantes para a utilização em estruturas que necessitem de elevada resistência aliada ao menor peso possível.

A produção de estruturas complexas com materiais compósitos obriga à adição de juntas estruturais. Isto torna necessário conhecer e desenvolver processos de ligação eficientes, uma vez que uma junta é uma zona de fragilidade na estrutura.

A utilização emergente de compósitos de matriz termoplástica em estruturas complexas abriu portas para novos processos de ligação. Este tipo de material, dada a sua capacidade de reprocessamento por aquecimento, permite a utilização de processos de soldadura análogos aos processos já utilizados na indústria dos polímeros termoplásticos. Visto isto, e no intuito de explorar as potencialidades do processo de soldadura e do material compósito termoplástico, procedeu-se à realização desta dissertação.

A dissertação apresentada pretendeu estudar o processo de ligação por soldadura de um compósito de polipropileno reforçado com fibra de vidro. Para isto, foi realizado um procedimento experimental com base na norma ASTM D1002, sendo calculado também o tempo de estágio e temperatura de processamento importantes. De forma a comparar este procedimento com uma ligação mais comum, foi realizado também um programa experimental de ligação adesiva com o mesmo compósito.

Foram realizados ensaios de tração aos provetes ligados de forma a determinar a tensão de corte máxima admissível. Os resultados obtidos demonstraram as potencialidades do processo de soldadura face ao processo de ligação adesiva em compósitos termoplásticos.

**Palavras-chave:**

Materiais compósitos, termoplásticos, ligação adesiva, ligação soldada, termoplástico, fibra de vidro



## ABSTRACT

The growth on composite material consumption shows the industry incessant search for increasable sustainable and efficient materials and methods. In this search, polymeric matrix composites show high physical, chemical and mechanical proprieties, allied with reduced mass. This makes them particularly interesting on structures for high resistance with minimal weight.

The manufacturing of complex structures using composite materials leads to the use of structural joints. This requires the knowledge and development of efficient bonding processes, because a joint is a frail zone on the structure.

The emergent use of thermoplastic composites in complex structures opens paths to new bonding and fabrication processes. This type of material, given its reprocessing capabilities using heat, allows the use of processes similar to the processes already used on the thermoplastic polymer industry. This dissertation was developed in order to explore the potential of this type of process and the thermoplastic composite.

The presented dissertation pretended the study of the fusion bonding process in a composite of polypropylene reinforced with glass fibers. An experimental procedure developed using the ASTM D1002 standard, while calculating a heat fabrication time for important processing temperatures. In order to compare this procedure with a more common bonding process, an adhesive bonding procedure was also created.

The test subjects were tested by tension loading them in order to determine the maximum shear strength. The results obtained were satisfactory and show the potential of the bonding process relative to adhesive bonding in thermoplastic composites.

**KEYWORDS:**

*Composite materials, thermoplastics, adhesive bonding, fusion bonding, thermoplastic, fiberglass*



## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

### Lista de Abreviaturas

---

FRP	Fiber Reinforced Plastic
GRP	Glass Reinforced Plastic
SIU	Sistema Internacional de Unidades

---

### Lista de Unidades

---

m	Unidade para longitude ou comprimento no SIU
mm	10 <sup>-3</sup> m
mm <sup>2</sup>	Unidade de área com base da longitude em 2 dimensões
m <sup>3</sup>	Unidade SIU para volume medido com base da longitude em 3 dimensões
g	Unidade de massa no SIU
kg	10 <sup>-3</sup> g
s	Unidade de tempo no SIU
min	Unidade de tempo correspondente a 60 segundos
C	Celsius. Unidade de Temperatura.
K	Kelvin. Unidade de temperatura SIU correspondente a -273,15°C
N	Newton. Unidade de força no SIU
kN	10 <sup>-3</sup> Newton
Pa	Pascal. Unidade de pressão/tensão no SIU
MPa	10 <sup>-6</sup> Pascal
J	Joule. Unidade de energia no SIU
W	Watt. Unidade de trabalho no SIU

---

### Lista de Símbolos

---

$\alpha$	Difusibilidade térmica
$\beta$	Coefficiente de expansão volumétrica do ar
$\varepsilon_m$	Emissividade do meio
$\theta$	Diferença de temperaturas entre temperatura ambiente e temperatura do meio de aquecimento
$\theta_i$	Diferença de temperaturas entre temperatura do compósito e temperatura do meio
$\eta$	Viscosidade do ar
$U_f$	Fração volúmica de fibras
$U_m$	Fração volúmica de matriz
$U_v$	Fração volúmica de vazios
$U_i$	Fração volúmica do constituinte i
$U_j$	Fração volúmica do constituinte j
$\omega_f$	Fração mássica de fibras
$\omega_m$	Fração mássica de matriz

---

---

$\omega_i$	Fração mássica do constituinte $i$ no compósito
$\sigma_{sb}$	Constante de Stefan-Boltzmann ( $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ )
$\tau$	150% da tensão de corte máxima esperada na ligação
$\rho$	Massa específica do ar
$\rho_c$	Densidade do compósito
$\rho_i$	Densidade do constituinte $i$
$A_a$	Área efetiva exposta ao aquecimento
$Bi$	Número de Biot
$c_p$	Calor específico a pressão constante
$Fo$	Número de Fourier
$F_{ty}$	Tensão de cedência do substrato
$g$	Aceleração da gravidade
$h_c$	Coefficiente de convexão
$h_r$	Coefficiente de convexão por efeito de radiação
$h_t$	Coefficiente de convexão total do sistema
$k$	Condutibilidade térmica do ar
$k_c$	Condutibilidade térmica do compósito
$L$	Comprimento de sobreposição
$L_c$	Dimensão característica
$q$	Calor libertado
$T$	Temperatura absoluta do compósito
$T_{amb}$	Temperatura ambiente
$T_c$	Temperatura do compósito
$T_{forno}$	Temperatura do forno
$T_h$	Temperatura absoluta do forno
$t$	Tempo de aquecimento
$t_e$	Espessura do substrato
$\Delta T$	Diferença de temperaturas
$V_c$	Volume do compósito
$V_i$	Volume do constituinte $i$
$W_i$	Massa do constituinte $i$ no compósito
$W_c$	Massa total do compósito
$x$	Incógnita ou valor do referencial de coordenadas na direção XX
$y$	Incógnita ou valor do referencial de coordenadas na direção YY

---

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 - PRODUÇÃO DE GRP NA EUROPA DE 2005 A 2015	8
FIGURA 2 - PROCESSO DE FABRICO PARA MATERIAIS COMPÓSITOS	11
FIGURA 3 - PROCESSOS DE LIGAÇÃO PARA COMPÓSITOS	13
FIGURA 4 - TIPOS DE LIGAÇÕES MECÂNICAS	14
FIGURA 5 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS MODOS DE FALHA PARA LIGAÇÃO MECÂNICA	15
FIGURA 6 - DESENHO DE UM DEHAVILLAND COMET MOSTRANDO ÁREAS DA ESTRUTURA LIGADAS COM REDUX 775	17
FIGURA 7 - TIPOS DE JUNTAS ADESIVAS	18
FIGURA 8 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES EM LIGAÇÃO MECÂNICA <i>VERSUS</i> LIGAÇÃO ADESIVA	19
FIGURA 9 - PROCESSOS DE LIGAÇÃO SOLDADA	21
FIGURA 10 - LIGAÇÃO POR PLACA QUENTE	22
FIGURA 11 - ESQUEMA DE JUNTA REALIZADA POR LASER	23
FIGURA 12 - PROCESSO DE LIGAÇÃO POR FRICÇÃO	23
FIGURA 13 - PROCESSO DE SOLDADURA POR ULTRASSONS	24
FIGURA 14 - PROCESSO DE SOLDADURA POR INDUÇÃO	25
FIGURA 15 - ESQUEMA PARA PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	34
FIGURA 16 – BARRA DE FIBRA DE VIDRO E POLIPROPILENO FABRICADA POR PULTRUSÃO	35
FIGURA 17 - DIMENSÕES E FORMA DA JUNTA	36
FIGURA 18 - MOLDE PARA PRODUÇÃO DE PROVETES ATRAVÉS DE SOLDADURA (1-BLOCO 2-MOLDE)	39
FIGURA 19- MUFLA NABERTHERM <sup>®</sup>	40
FIGURA 20 - EQUIPAMENTO DE ENSAIO DE TRAÇÃO SHIMADZU AGS-X <sup>®</sup>	42
FIGURA 21 - PROVETE DE LIGAÇÃO ADESIVA	43
FIGURA 22 - TENSÃO DE CORTE MÉDIA POR ENSAIO @ 510 K	46
FIGURA 23- TENSÃO DE CORTE MÉDIA POR ENSAIO @ 510 K COM VERIFICAÇÃO DE TENDÊNCIA	47
FIGURA 24 - LINHA DE TENDÊNCIA PARA ENSAIOS A 510 K	47
FIGURA 25- TENSÃO DE CORTE MÉDIA POR ENSAIO @ 550 K	49
FIGURA 26 - TENSÃO DE CORTE MÉDIA POR ENSAIO @ 550 K COM VERIFICAÇÃO DE TENDÊNCIA	50
FIGURA 27 - LINHA DE TENDÊNCIA PARA ENSAIOS A 550 K	50
FIGURA 28 - TENSÃO DE CORTE MÉDIA POR ENSAIO @ 590 K	52
FIGURA 29 - TENSÃO DE CORTE MEDIA POR ENSAIO @ 590 K COM VERIFICAÇÃO DE TENDÊNCIA	53
FIGURA 30 - LINHA DE TENDÊNCIA PARA ENSAIOS A 590 K	53
FIGURA 31 - TENSÃO DE CORTE MÉDIA POR TRATAMENTO DE SUPERFÍCIE	54
FIGURA 32 - TENSÃO DE CORTE MÉDIA POR ENSAIO	58



## ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 - TABELA COMPARATIVA DAS DIVERSAS PROPRIEDADES DOS MATERIAIS DE MATRIZ TERMOENDURECÍVEL E MATERIAIS CONVENCIONAIS COM AS SUAS RESPECTIVAS PROPRIEDADES ....	9
TABELA 2 - VANTAGENS E DESVANTAGENS DE LIGAÇÕES MECÂNICAS EM COMPÓSITOS .....	16
TABELA 3 – PROPRIEDADES CALCULADAS DO MATERIAL COMPÓSITO .....	35
TABELA 4 - DETERMINAÇÃO DE DIMENSÕES DA JUNTA .....	37
TABELA 5 - PROPRIEDADES PARA CÁLCULO DO COEFICIENTE DE CONVEXÃO NATURAL .....	38
TABELA 6 - PARÂMETROS PARA CÁLCULO DE CONVEXÃO POR EFEITO DE RADIAÇÃO .....	38
TABELA 7 - DADOS PARA CÁLCULO DO NÚMERO DE BIOT .....	38
TABELA 8 - DADOS PARA CÁLCULO DO TEMPO DE ESTÁGIO .....	39
TABELA 9 - QUADRO DE ESTÁGIOS DE TEMPERATURA E TEMPOS A APLICAR .....	41
TABELA 10 - PREPARAÇÕES DE SUPERFÍCIE .....	43
TABELA 11 - TENSÃO DE CORTE POR ENSAIO PARA TEMPERATURA DE 510 K.....	45
TABELA 12 - TENSÃO DE CORTE PARA ENSAIOS A 510 K COM VERIFICAÇÃO DE TENDÊNCIA.....	46
TABELA 13 - PROVETES DE SOLDADURA À TEMPERATURA DE 550 K.....	48
TABELA 14 - PROVETES DE SOLDADURA À TEMPERATURA DE 550 K COM VERIFICAÇÃO DE TENDÊNCIA..	49
TABELA 15 - PROVETES DE SOLDADURA À TEMPERATURA DE 590 K.....	51
TABELA 16 - PROVETES DE SOLDADURA À TEMPERATURA DE 550 K COM VERIFICAÇÃO DE TENDÊNCIA..	52
TABELA 17 - PROVETES DE LIGAÇÃO ADESIVA.....	54
TABELA 18 - TENSÃO DE CORTE MÁXIMA E TENSÃO DE CORTE MÉDIA POR ENSAIO REALIZADO.....	56



## ÍNDICE

RESUMO.....	I
ABSTRACT.....	II
LISTA DE SIMBOLOS E ABREVIATURAS.....	III
INDICE DE FIGURAS.....	V
INDICE DE TABELAS.....	VI
1 INTRODUÇÃO .....	2
<b>1.1 Contextualização .....</b>	<b>2</b>
<b>1.2 Objetivos .....</b>	<b>3</b>
<b>1.3 Organização da dissertação .....</b>	<b>3</b>
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	7
<b>2.1 Materiais Compósitos de Matriz Polimérica.....</b>	<b>7</b>
<b>2.2 Processos de Ligação para Materiais Compósitos .....</b>	<b>12</b>
<b>2.2.1 Ligação Mecânica .....</b>	<b>13</b>
<b>2.2.2 Ligação Adesiva .....</b>	<b>17</b>
<b>2.2.3 Ligação por Soldadura .....</b>	<b>20</b>
3 CONCEITOS E FORMULAÇÃO TEÓRICA .....	27
<b>3.1 Determinação de Propriedades do Material .....</b>	<b>27</b>
<b>3.2 Definição do Processo de Aquecimento .....</b>	<b>30</b>
4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	34
<b>4.1 Procedimento Experimental para Soldadura.....</b>	<b>34</b>
<b>4.1.1 Material utilizado .....</b>	<b>35</b>
<b>4.1.2 Cálculo dimensional da Junta .....</b>	<b>36</b>
<b>4.1.3 Determinação da temperatura e estágio de tempo .....</b>	<b>37</b>
<b>4.1.4 Ensaios realizados .....</b>	<b>40</b>
<b>4.2 Procedimento de Ligação por Adesivo Estrutural .....</b>	<b>42</b>
<b>4.2.1 Preparação de superfície .....</b>	<b>42</b>

4.2.2	<i>Colagem de substratos e tab's</i> .....	43
4.2.3	<i>Ensaio de Provetes</i> .....	43
5	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	45
5.1	<b>Apresentação de resultados</b> .....	45
5.1.1	<b>Provetes de Soldadura à temperatura de 510 K</b> .....	45
5.1.2	<b>Provetes de soldadura à temperatura de 550 K</b> .....	48
5.1.3	<b>Provetes de soldadura à temperatura de 590 K</b> .....	51
5.1.4	<b>Provetes de ligação adesiva</b> .....	54
5.2	<b>Discussão de resultados</b> .....	55
5.3	<b>Considerações Finais e Sugestões para trabalhos Futuros</b> .....	59
6	<b>BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO</b> .....	61

# INTRODUÇÃO

**1.1 Contextualização**

**1.2 Objetivos**

**1.3 Organização da dissertação**

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização

De acordo com a *Federation of Reinforced Plastics*, o consumo de materiais compósitos teve um incremento de 20% desde 2008 [1]. Esta tendência demonstra a procura incessante de materiais e metodologias cada vez mais eficientes e sustentáveis na indústria [2]–[4]. Considerando esta demanda de materiais mais eficientes, os compósitos de matriz polimérica apresentam características interessantes para a indústria, nomeadamente propriedades físicas muito distintas (comparativamente com um metal ou um polímero) [5]–[7]. A sua baixa densidade aliada à elevada resistência e a capacidade de ajuste de propriedades conforme a aplicação desejada torna este tipo de materiais importantes na indústria atual [5]–[7]. Face às necessidades de uma maior eficiência e sustentabilidade, este tipo de materiais torna-se essencial na indústria, nomeadamente nas que necessitem de construções de elevada resistência aliada ao menor peso, tais como, na aeronáutica, náutica e automóvel [8], [9].

Recentemente, os processos mais utilizados na ligação estrutural de compósitos de matriz polimérica (termoplásticos e termoendurecíveis) baseiam-se na adição de materiais que permitem a união de componentes, nomeadamente parafusos, rebites ou adesivos estruturais [10]–[12]. Os compósitos de matriz termoplástica têm vindo a ser utilizados em detrimento dos termoendurecíveis, dada a sua possibilidade de reciclagem e reduzidos custos de fabrico [13], [14]. Este tipo de material apresenta vantagens ao nível de propriedades físicas, nomeadamente elevada tenacidade à fratura, baixo tempo de processamento e resistência a fatores ambientais [15].

No caso dos compósitos termoplásticos, tal como os de matriz de polietileno e polipropileno, estes apresentam a capacidade de serem reprocessados sem perdas relevantes de propriedades mecânicas [15], [16]. Esta capacidade possibilita o desenvolvimento e realização de processos de soldadura neste material, o que se revela mais benéfico devido a ligação ser realizada sem necessidade de materiais terceiros [17], [18].

## 1.2 Objetivos

A ligação soldada de materiais compósitos de matriz termoplástica proporciona novas possibilidades de processamento, construção e reparação de compósitos [19]. Considerando as vantagens referidas no ponto anterior, e tendo em especial atenção o potencial de crescimento que os compósitos de matriz termoplástica têm para aplicações de elevado desempenho, é relevante o estudo de processos de ligação que utilizem as capacidades inerentes a este tipo de materiais, como é o caso da soldadura [5], [18], [20].

Considerando estes pressupostos, é objetivo desta dissertação a avaliação de funcionalidade de juntas de sobreposição simples de material compósito com matriz termoplástica (fibra de vidro e resina de polipropileno), realizadas através de soldadura. Tendo por base este objetivo, procedi à seguinte divisão do trabalho:

- Determinação de parâmetros de soldadura (temperatura e tempo de estágio) para soldadura de fibras contínuas de vidro com matriz de polipropileno;
- Produção de juntas de sobreposição simples soldadas com os parâmetros determinados no tópico supracitado;
- Desenvolvimento de metodologias de ensaio de tração das juntas de sobreposição simples realizadas através de soldadura;
- Comparação da tensão de corte calculada através do ensaio de tração com os ensaios realizados com ligação adesiva e com bibliografia existente.

## 1.3 Organização da dissertação

Face aos objetivos propostos em 1.2, a dissertação “Ligação Soldada de Compósitos de Fibra de Vidro e Polipropileno” apresenta um primeiro capítulo de revisão bibliográfica, tendo como principais questões os compósitos de matriz polimérica, sua composição e diferenciação. Neste capítulo é feita uma breve definição de material compósito, seus principais constituintes e a sua aplicação no mercado global.

É efetuada também uma revisão ao estado da arte dos processos de ligação utilizados em materiais compósitos, abordando as suas principais vantagens e inconvenientes.

O terceiro capítulo aborda todos os conceitos de formulação teórica utilizados nos capítulos subsequentes, tais como determinação de propriedades de compósitos, metodologia para aquecimento de provetes e uma abordagem ao efeito da direção das fibras na resistência do compósito.

O quarto capítulo desta dissertação aborda o desenvolvimento de todo o processo de ligação soldada, desde o dimensionamento do provete de teste, determinação de processo e parâmetros de aquecimento e posterior teste do mesmo. São explicitados todos os passos e considerações tomadas pelo autor para o desenvolvimento e execução do procedimento experimental. O capítulo enuncia os ensaios de soldadura com vários estágios de tempo e temperatura, sendo também efetuados ensaios de ligação adesiva como método de comparação.

No quinto capítulo o autor procede à apresentação dos resultados obtidos nos diversos ensaios realizados, procedendo a cálculos de tensão de corte máxima e a tensão de corte média para cada conjunto de provetes, possibilitando assim a comparação dos mesmo e a obtenção dos parâmetros ótimos de processamento para se obter uma junta com boas propriedades mecânicas.

# REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

## **2.1 Materiais Compósitos de Matriz Polimérica**

## **2.2 Processos de Ligação para Materiais Compósitos**

### **2.2.1 Ligação Mecânica**

### **2.2.2 Ligação Adesiva**

### **2.2.3 Ligação por Soldadura**



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Materiais Compósitos de Matriz Polimérica

A gênese de um material compósito surgiu da necessidade de associar a uma mesma massa propriedades de materiais de natureza distinta, de modo a obter melhorias de desempenho que não eram alcançadas com um só material [21], [22]. Estes possuem boas propriedades tanto a nível físico, químico como incrementos de resistência mecânica [21], [22]. A designação material compósito apresenta diversos conceitos, podendo ser definidos como uma junção de dois ou mais materiais em que as propriedades do conjunto superam as dos seus constituintes singularmente [22], [23]. São também considerados como uma combinação, a nível macroscópico, de dois ou mais materiais, existindo uma interface distinta entre si [24].

Os compósitos englobam aumento de propriedades tanto a nível físico, químico como incrementos de resistência mecânica, o que desperta grande interesse na procura de materiais compósitos, mesmo em sectores de mercado muito distintos [21], [22]. Estes permitem a fácil combinação de diferentes materiais e tecnologias de fabrico, isto permite adequar as condições de produção e características finais dos componentes em compósito às exigências específicas de cada aplicação [25].

Os compósitos de matriz polimérica, também designados por *Fiber Reinforced Plastics* (FRP), constituem uma gama de materiais compósitos com um elevado valor comercial, sendo também os mais utilizados [23], [26].

Com as retificações no Protocolo de Quioto (2008) e a conferência de Copenhaga (2009), a indústria foi estimulada para a busca e utilização de materiais mais eficientes, de forma a reduzir os níveis de CO<sub>2</sub>. Na **Figura 1** está representado graficamente a produção europeia de plástico reforçado com fibra de vidro (*Glass Reinforced Plastic*), um tipo de FRP, entre os anos de 2005 a 2015. Constata-se que, comparativamente com o ano de 2009, em 2014 a produção de GRP aumentou 254 quilotoneladas, o que representa um incremento de 20% (**Figura 1**). À data da publicação, estimava-se uma produção de GRP

na ordem das 1069 quilotoneladas, o que representaria um incremento de 2% comparativamente com os valores de 2014.

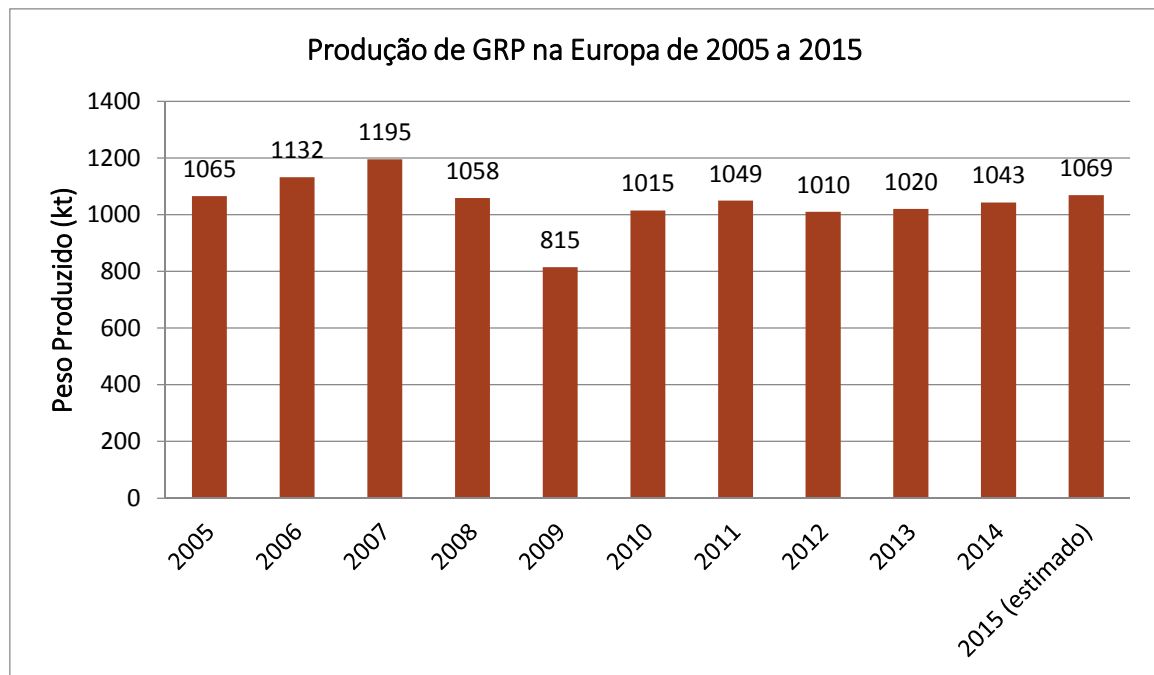


Figura 1 - Produção de GRP na Europa de 2005 a 2015. Adaptado de [1]

Os FRP, que representam a maioria das aplicações de compósitos, são compostos por fibras que reforçam uma matriz, em que a matriz tem origem em dois tipos de materiais: termoendurecíveis e termoplásticos.

Os materiais termoendurecíveis são constituídos por polímeros em que as moléculas formam estruturas tridimensionais bastante rígidas [27]. São fornecidas para processamento sob a forma de uma mistura de dois ou três componentes: resina, acelerador e catalisador ou endurecedor [23]. Estes componentes ao serem misturados, dá-se a polimerização e a constituição da estrutura tridimensional, num processo designado “cura”[28]. Algumas resinas requerem a aplicação adicional de calor e pressão para se efetuar a cura, sendo que existem resinas que curam à temperatura e pressão ambiente (1 bar; 25°C) [28], [29]. A **Tabela 1** apresenta uma tabela comparativa entre compósitos de matriz termoendurecível e materiais convencionais. É possível constatar, pela análise da **Tabela 1**, que o módulo de elasticidade específico dos materiais compósitos é mais elevada que a dos metais. Utilizando como exemplo o epóxico com fibra de vidro (61%), este apresenta um valor 3,4 vezes superior, o que denota um material mais rígido.

**Tabela 1 - Tabela comparativa das diversas propriedades dos materiais de matriz termoendurecível e materiais convencionais com as suas respectivas propriedades [23]**

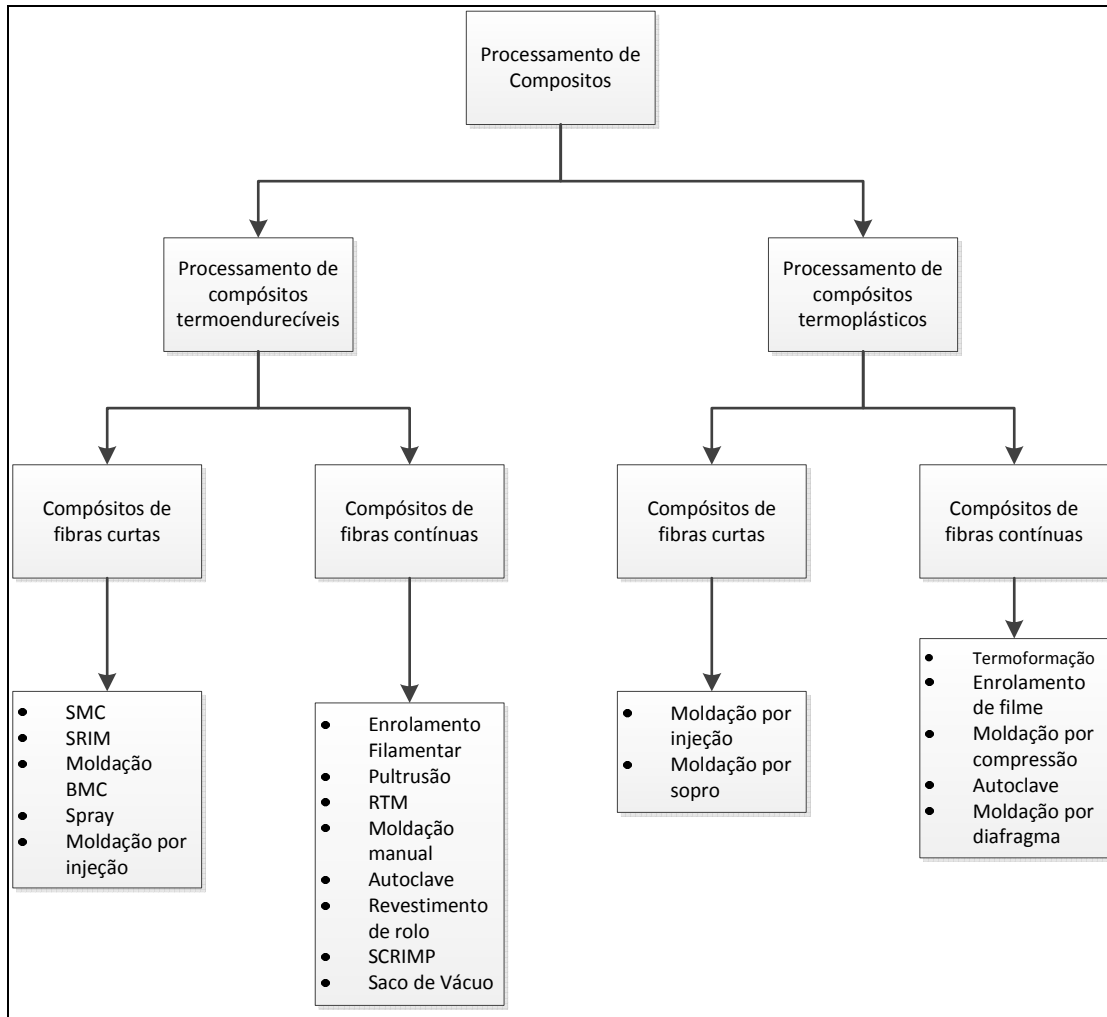
Material	Peso Específico (g/cc)	Módulo de Elasticidade (E) (GPa)	Tensão de Cedência ( $\sigma$ ) (GPa)	Módulo de elasticidade específico (E/ $\rho$ )	Tensão de cedência específica ( $\sigma/\rho$ )	Temperatura máxima de serviço (°C)
<b>Metais</b>						
Ferro fundido, grau 20	7,0	100	0,14	14,3	0,02	230-300
Aço, AISI 1045	7,8	205	0,57	26,3	0,073	500-650
Alumínio 2024-T4	2,7	73	0,45	27	0,17	150-250
Alumínio 6061-T6	2,7	69	0,27	25,5	0,10	150-250
<b>Plásticos</b>						
Nylon 6/6	1,15	2,9	0,082	2,52	0,071	75-100
Polipropileno	0,9	1,4	0,033	1,55	0,037	50-80
Epóxico	1,25	3,5	0,069	2,8	0,055	80-215
Fenólico	1,35	3,0	0,006	2,22	0,004	70-120
<b>Cerâmicos</b>						
Alumina	3,8	350	0,17	92,1	0,045	1425-1540
MgO	3,6	205	0,06	56,9	0,017	900-1000
<b>Compósitos de fibras curtas</b>						
Epóxico com fibra de vidro (35%)	1,9	25	0,30	8,26	0,16	80-200
Poliéster com fibra de vidro (35%)	2,0	15,7	0,13	7,25	0,065	80-125
Nylon com fibra de vidro (35%)	1,62	14,5	0,20	8,95	0,12	75-110
Nylon com fibra de vidro (60%)	1,95	21,8	0,29	11,18	0,149	75-110
<b>Compósitos unidirecionais</b>						
Epóxico com fibra de vidro S (45%)	1,81	39,5	0,87	21,8	0,48	80-215
Epóxico com fibra de carbono (61%)	1,59	142	1,73	89,3	1,08	80-215
Epóxico com Kevlar (53%)	1,35	63,6	1,1	47,1	0,81	80-215

Uma das principais vantagens das resinas termoendurecíveis é a maior facilidade de impregnação do reforço, uma vez que antes da cura apresentam viscosidades bastante inferiores às dos termoplásticos [30]. Isto leva a que estes materiais não necessitem geralmente de pressão e temperatura elevada para obter uma boa impregnação. Este tipo de material tem desvantagens ao nível do reprocessamento, uma vez que não pode ser reciclado e, ao sofrer aquecimento perde propriedades e sofre degradação [28]. Este tipo de resinas tem também um tempo de armazenamento limitado [31].

Os materiais termoplásticos são formados a partir de macromoléculas individuais lineares sem qualquer reticulação entre si. Estas moléculas de grandes dimensões são mantidas nos seus lugares à custa de forças intermoleculares ou ligações de Van der Waals [28].

Quando se aquecem os polímeros termoplásticos, estas ligações são temporariamente quebradas e passa a existir mobilidade molecular, o que permite a moldação em novas posições [28], [30]. Com o posterior arrefecimento, as moléculas fixam-se nas posições alcançadas, restabelecendo-se as ligações químicas iniciais [30]. Este processo é reversível, o que torna os termoplásticos possíveis de serem processados e reprocessados sem perda aparente das suas características [29]. É de notar que estes podem ser facilmente adaptáveis a outros processos de fabrico comumente utilizados, tais como moldação por injeção ou a termoformação, sendo mais facilmente processados.

Existem diversos processos de fabrico associados aos materiais compósitos de matriz polimérica. A **Figura 2** apresenta um quadro com os principais processos de fabrico associados à produção de compósitos.



**Figura 2 - Processo de fabrico para materiais compósitos. Adaptado de [25]**

Analisando a **Figura 2**, e tal como referido anteriormente, verificamos que os processos de fabrico associados à produção de compósitos termoendurecíveis são efetuados a temperatura ambiente (25 °C) [23]. Isto deve-se à baixa viscosidade da sua matriz, que permite a impregnação das fibras sem ser necessário aumentar a temperatura[23].

Relativamente à impregnação para matrizes de compósitos termoplásticos, estas necessitam obrigatoriamente de um processo de fabrico que permita o seu aquecimento, uma vez que a sua viscosidade elevada dificulta a impregnação das fibras.

Apesar da logística necessária para o aquecimento da matriz termoplástica, os compósitos deste tipo apresentam vantagens importantes relativamente aos compósitos termoendurecíveis. A sua elevada ductilidade e resistência, associada à possibilidade de reprocessamento, torna-os materiais de elevado interesse na evolução dos compósitos estruturais, assim que garantidos os processos de ligação adequados [25].

## 2.2 Processos de Ligação para Materiais Compósitos

Idealmente, os produtos seriam realizados apenas com um componente, dado que ao adicionar juntas, estão a ser criadas potenciais zonas de concentração de tensões, bem como secções com menor resistência na estrutura [21], [25]. No entanto, e devido a limitações nos processos de fabrico, complexidade da estrutura e necessidade de acesso interior para manutenção, a introdução de juntas torna-se uma necessidade de projeto [25].

Face ao incremento na utilização de materiais compósitos em aplicações estruturais, bem como as vantagens associadas a sua utilização, estes requereram uma melhoria nos métodos de projeto e fabrico de estruturas [10]. A eficiência de estruturas em material compósito depende, em grande parte, da eficiência das ligações que as compõe [24]. Dada a grande variedade de materiais utilizados para a produção de compósitos, é necessária a implementação de distintos e variados processos de ligação, que sejam diretamente dependentes dos seus constituintes. Os principais métodos ou processos de ligação para compósitos são apresentados na **Figura 3**.

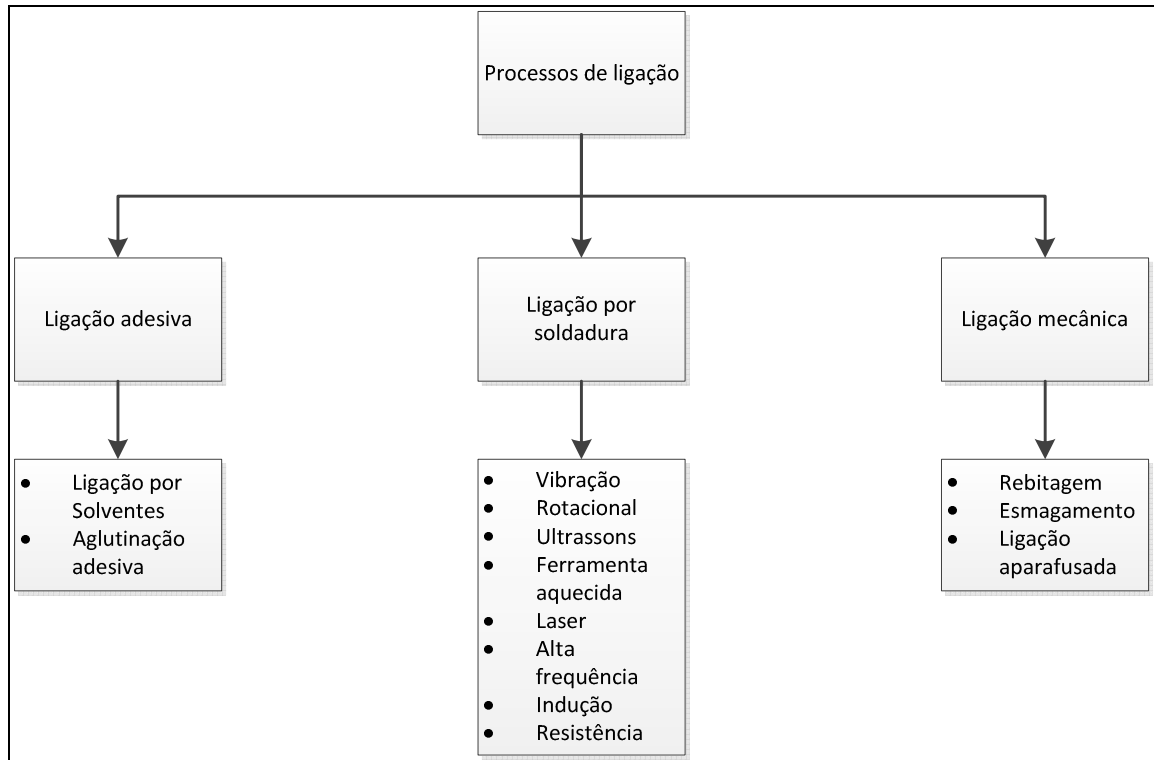


Figura 3 - Processos de ligação para compósitos. Adaptado de [32]

### 2.2.1 Ligação Mecânica

A ligação mecânica inclui todo o tipo de uniões que impliquem a utilização de um elemento mecânico para unir os componentes, tais como parafusos e rebites [21]. Este tipo de ligação tem sido maioritariamente utilizada em aplicações no ramo da aeronáutica, tendo sido desenvolvida e estudada por diversos autores [33]–[35]. A **Figura 4** demonstra os mais usuais tipos de ligações mecânicas utilizados [21].

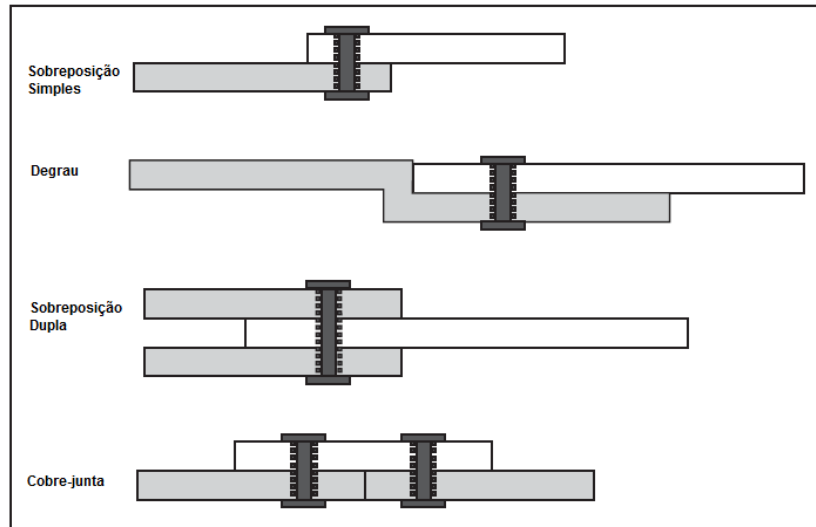


Figura 4 - Tipos de ligações mecânicas. Adaptado de [21]

Existem diversos estudos relativos a este tipo de ligação, nomeadamente no que concerne a concentração de tensões na zona da ligação. Mccarthy & Mccarthy fizeram uma abordagem aos principais modos de falha (**Figura 5**) e analisaram juntas para a indústria aeronáutica. Estes autores realizaram simulações por elementos finitos de várias juntas, analisando a concentração de tensões em cada uma delas [34]. Já anteriormente tinham sido apresentados modelos para este tipo de ligação, como é o caso do modelo apresentado por Agarwal em 1980, que estuda juntas de sobreposição simples com ligação através de um parafuso [36]. Este tipo de processo de ligação tem variações de resistência mediante o empilhamento utilizado no fabrico do compósito.

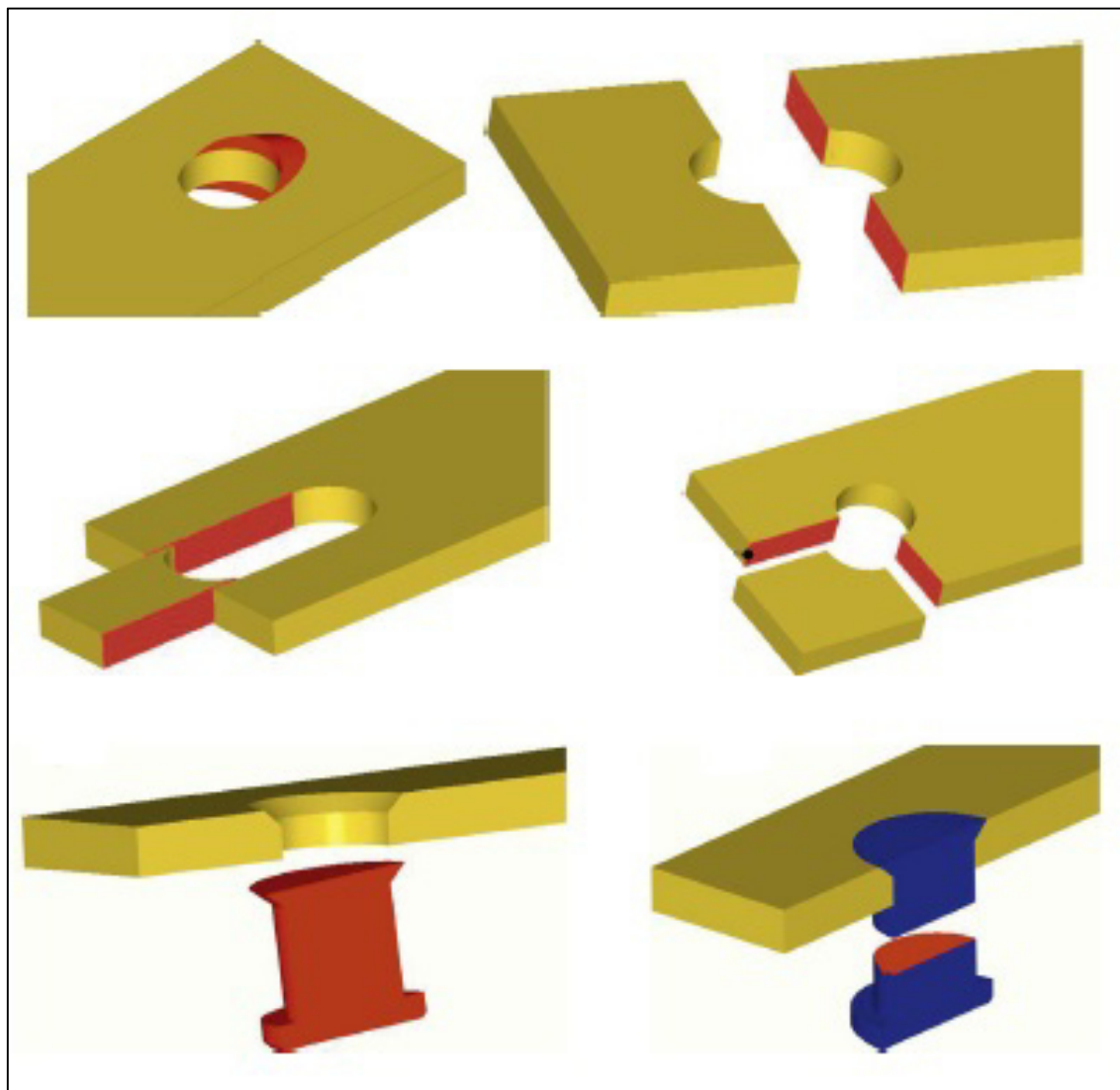


Figura 5 – Representação esquemática dos modos de falha para ligação mecânica. Adaptado de [34]

Park comprovou, utilizando compósitos com diferentes tipos de alinhamento, que os compósitos de fibras contínuas alinhadas na direção do carregamento, ligados através de elemento mecânico, resistem a menos esforço do que compósitos quase-isotrópicos, uma vez que sofrem cisalhamento [37]. Em 1999, Camanho & Mathews desenvolveram um método que permitia prever a progressão de dano num compósito com o carregamento [33]. Este tema foi também estudado em 2012 por Tserpes *et al.*, que analisaram juntas por modelação de elementos finitos para previsão de propagação de dano, complementando o trabalho realizado por autores em anos anteriores [38].

Os processos de ligação mecânica apresentam vantagens e inconvenientes na sua utilização, estando listados na **Tabela 2** as principais vantagens e desvantagens na utilização deste tipo de processos.

Tabela 2 - Vantagens e desvantagens de ligações mecânicas em compósitos

Vantagens	Desvantagens
Aplicação de processo simples	Necessidade de maquinagem
Tecnologia já desenvolvida	Concentração de tensões
Possibilidade de desmontagem	Tensões de cisalhamento
Sem preparação de superfície	Delaminação

No que concerne a vantagens, a ligação mecânica apresenta simplicidade de aplicação do processo. Estas não necessitam de preparação de superfície, tais como limpeza, lixagem ou granalhagem, sendo também resistentes a fatores ambientais, tais como temperatura e ambientes corrosivos [22], [39]. Apresentam ainda a possibilidade, dependendo do elemento de ligação utilizado, serem realizadas ligações que possam ser desmontadas. Isto tem particular importância em estruturas que necessitem de remoção de painéis ou partes para efeitos de manutenção e reparação [40], [41].

As desvantagens associadas a este processo prendem-se pela necessidade de maquinagem do compósito que, caso efetuada sem cuidado, pode dar origem a delaminação [22]. Este tipo de defeitos na furação de compósitos tem sido analisado por vários autores, tal como Durão *et al.* e Tsao *et al.*, de forma a melhorar o processo e evitar a delaminação [42], [43]. Revendo o já mencionado anteriormente, este processo, a eficácia deste processo depende, em grande parte, da orientação das fibras do compósito. Mediante a orientação das fibras, o compósito pode apresentar maior ou menos resistência a tensões de cisalhamento [37]. A utilização de juntas mecânicas em materiais compósitos apresenta ainda problemas ao nível da concentração de tensões, uma vez que, comparativamente com os materiais metálicos que muitas vezes tentam substituir, os compósitos apresentam uma plasticidade muito mais reduzida [38], [44].

## 2.2.2 Ligação Adesiva

A ligação por adesivos é uma tecnologia emergente que permite solucionar problemas associados às tradicionais técnicas de ligação [45]–[47].

Um adesivo é um material polimérico que quando aplicado em superfícies é capaz de criar ligações com ambas as partes para que estes se integrem como uma peça completa [45]–[47].

A fim de demonstrar a importância da ligação adesiva e, a título de exemplo, na **Figura 6** **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** estão representadas algumas áreas ligadas com adesivo estrutural numa aeronave. Higgins aborda a utilização de adesivos estruturais na indústria aeronáutica, referindo que estes são utilizados para unir diversos tipos de reforço estrutural a componentes [48].

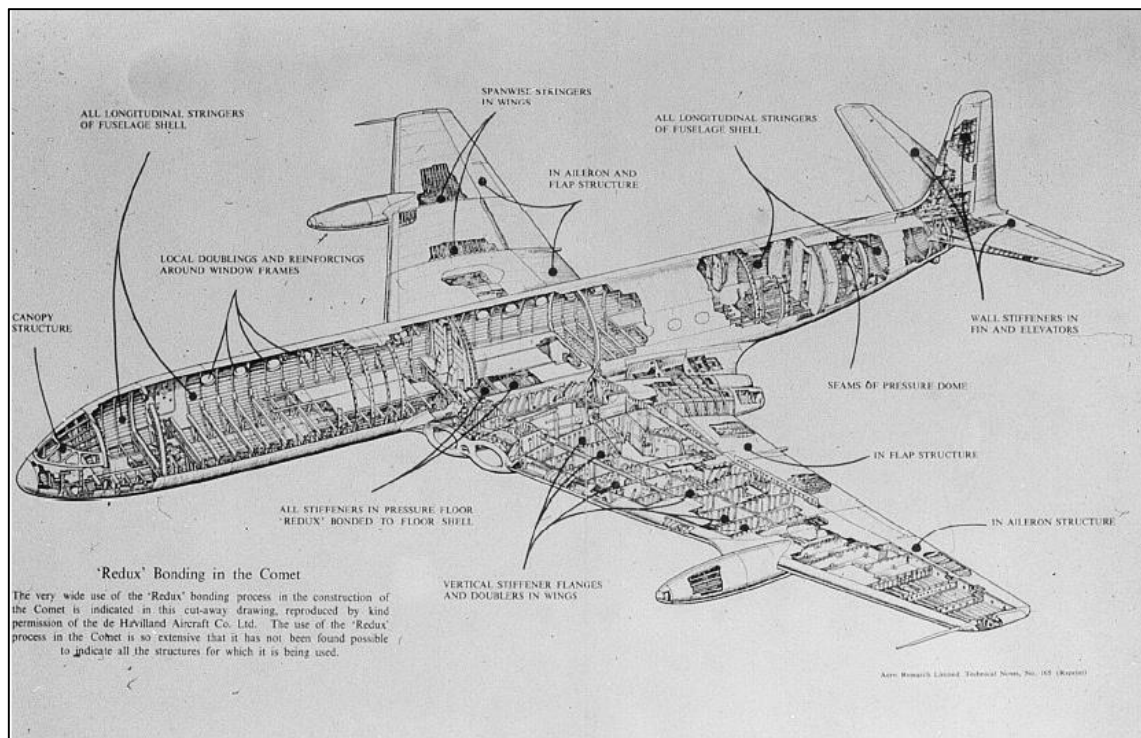
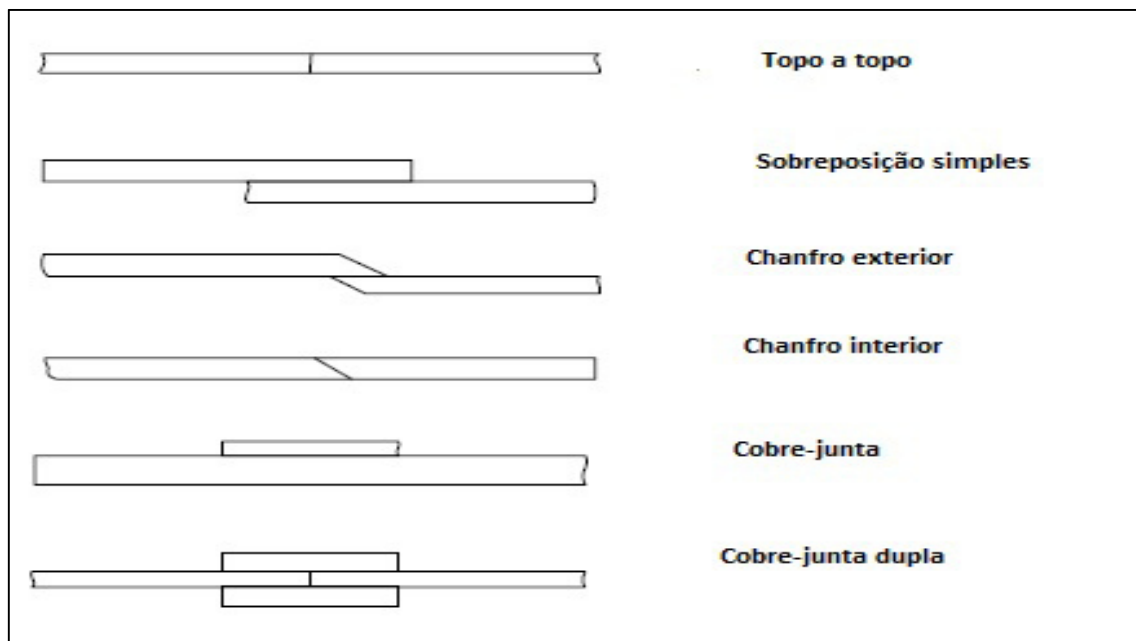


Figura 6 - Desenho de um DeHavilland Comet mostrando áreas da estrutura ligadas com Redux 775 [48]

Existem dois principais tipos de adesivos: os adesivos não-estruturais e os adesivos estruturais [49]. Os segundos são materiais de elevada resistência capazes de conferir à ligação adesiva uma resistência ao corte superior a 7 MPa [47], [49]. A principal função dos adesivos estruturais é manter ligadas as estruturas, sendo capazes de resistir a cargas elevadas sem grande deformação nos mais variados ambientes. Assim, uma cuidada preparação superficial é necessária para maximizar a sua capacidade [46], [50]. Os principais tipos de ligações adesivas são apresentados na **Figura 7**.



**Figura 7 - Tipos de juntas adesivas. Adaptado de [47]**

Comparativamente com as ligações mecânicas tratadas no subtópico anterior, este tipo de ligação é mais leve, ao não utilizar elementos mecânicos de reforço que aumentam o peso da estrutura. São também mais vantajosas no que concerne a concentração de tensões, por permitir uma uniformização das tensões aplicadas ao longo da junta [51].

A **Figura 8** apresenta a distribuição de tensões em ligação mecânica e ligação adesiva.

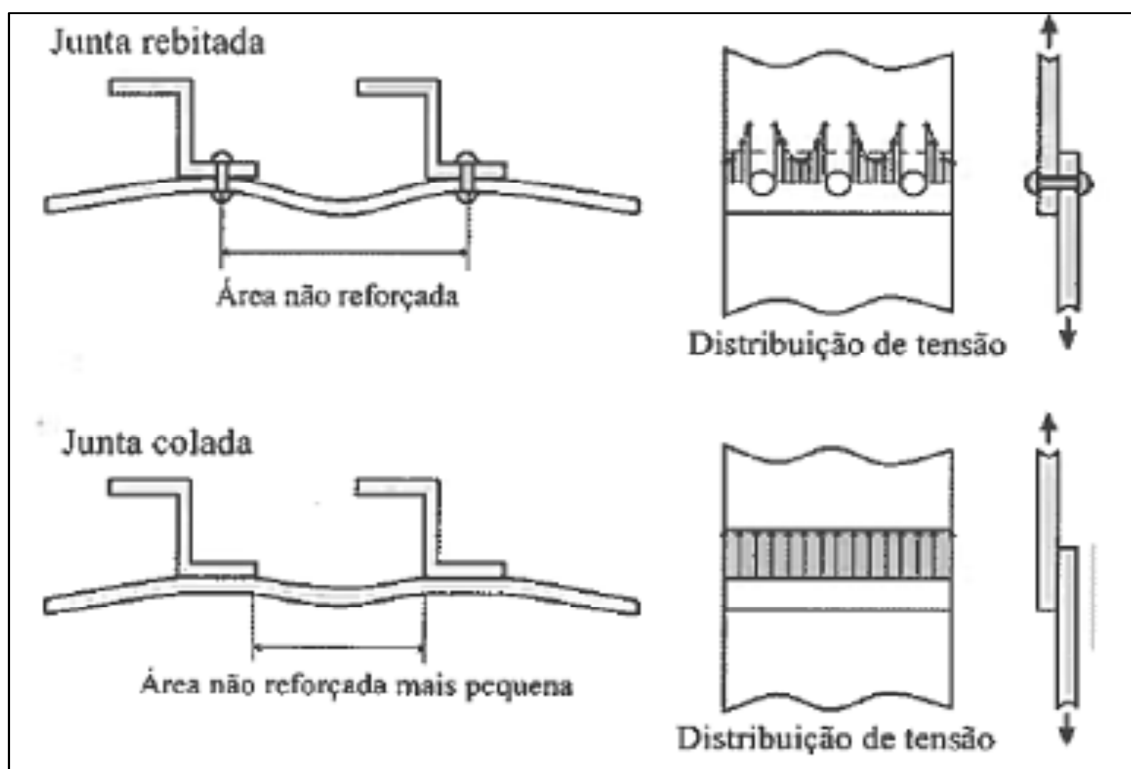


Figura 8 – Representação esquemática da distribuição de tensões em ligação mecânica *versus* ligação adesiva.

Adaptado de [49]

Os materiais unidos através de ligação adesiva necessitam de tratamento superficial para garantir a adesão<sup>1</sup> do adesivo [45][49]. Este tipo de tratamento é o passo mais importante na execução de uma junta adesiva que, se efetuada sem cuidado, pode não garantir uma ligação eficaz entre o substrato<sup>2</sup> e o adesivo.

O tema das ligações adesivas em compósito tem sido um tema estudado devido à procura de materiais com elevada resistência e peso reduzido. O estudo de ligações adesivas remonta a 1938, onde Volkersen desenvolveu um modelo que considera um comportamento puramente elástico dos materiais e a deformação do adesivo só ao corte [52]. Em estudos mais atuais, e com auxílio a *software* de modelação por elementos finitos é possível prever com mais rigor o comportamento deste tipo de juntas.

<sup>1</sup> **Adesão:** Atração entre duas substâncias resultante das forças intermoleculares que se estabelecem entre elas

<sup>2</sup> **Substrato:** É o material a ser ligado. Após a ligação pode também ser designado por aderente

No entanto, deve-se considerar que o estudo de adesivos estruturais ainda se baseia muito na análise estatística devido à dispersão de resultados, pois não conseguimos garantir uma estrutura uniforme por todo o compósito. Tomando como exemplo o trabalho de Neto *et al.*, estes autores estudaram a ligação adesiva de materiais compósitos através de modelação por elementos finitos e posterior ensaio mecânico, de forma a descobrir os modos de falha da ligação [53]. Moura *et al.* e Ribeiro *et al.* estudaram o efeito de juntas de sobreposição com defeitos na ligação adesiva. Ambos puderam concluir que os defeitos afetavam diretamente a resistência da junta [54], [55].

Em suma, podemos concluir que adesivos estruturais têm como vantagens:

- A distribuição uniforme de tensões ao longo da área de ligação ou sobreposição, o que melhora a rigidez e transmissão de esforço [54];
- Permite ligar materiais de origens distintas, mesmo com diferentes coeficientes de expansão, dado que a flexibilidade do adesivo permite compensar sua divergência [47], [49].

Este processo de ligação tem como inconveniente:

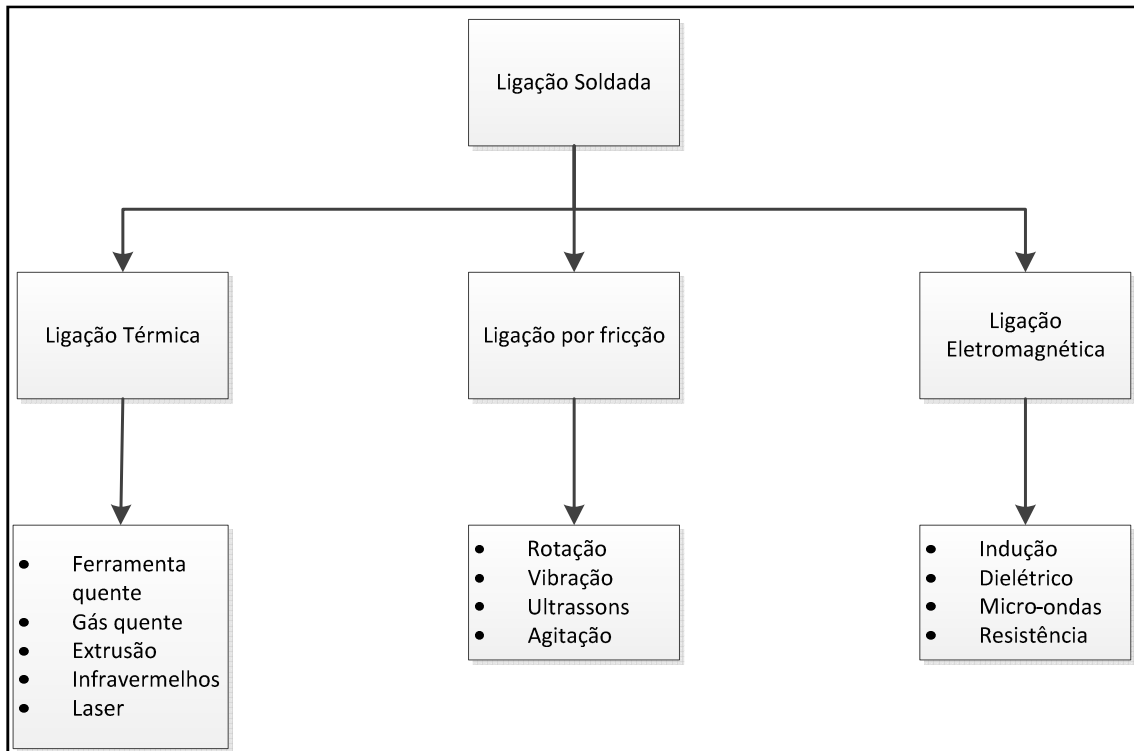
- A preparação de superfície necessária para garantir uma ligação eficaz;
- A adição de defeitos na junta reduz o seu desempenho [54], [55];
- A vida útil do adesivo é também afetada pelo meio onde será utilizado [47].

### 2.2.3 Ligação por Soldadura

A origem da ligação de compósitos por soldadura acompanha as necessidades do mercado no que concerne a produto estrutural final. Inicialmente, o que se procurou com os materiais compósitos foi um aumento de propriedades mecânicas aliado à redução de peso. A tecnologia mais convencional para produção de compósitos era a utilização de matrizes termoendurecíveis. De forma a produzir estruturas complexas, estes compósitos podiam ser ligados através de elementos mecânicos ou adesivos estruturais. Com o advento dos compósitos termoplásticos, mais dúcteis e resistentes, surgem também novas tecnologias de ligação, semelhantes as já utilizadas na indústria dos polímeros termoplásticos [13], [18]. Estes processos consistem no aquecimento dos polímeros até um estado de baixa viscosidade, o que provoca a difusão interna das ligações poliméricas [32]. Após o aquecimento e difusão, é realizado o arrefecimento.

Tipicamente a qualidade das peças soldadas é equiparável à dos componentes feitos por autoclave e moldação por termo-compressão [32]. Num processo semelhante ao da autoclave, as cadeias poliméricas são misturadas e interligam-se, resultando no desaparecimento da zona de união e possibilitando a transferência de carregamento [32].

A **Figura 9** apresenta um diagrama com os vários tipos de ligação soldada.



**Figura 9 - Processos de ligação soldada. Adaptado de [32]**

Os processos de ligação térmica consistem na fusão do material através de aquecimento externo, sendo posteriormente forjadas. Um equipamento ou fonte de calor externa aplica calor diretamente nos componentes a serem ligados, fundindo a matriz [32]. Após aquecidos, os componentes são ligados por efeito de pressão, sendo posteriormente arrefecidos [32]. Os processos associados à ligação térmica têm sido estudados por autores como Ghede *et al.*, que estudou o processo de ferramenta ou placa quente. Neste processo, os autores procederam ao aquecimento de uma placa, sendo posteriormente pressionados substratos de polipropileno reforçado com manta de fibra de vidro. Estes substratos eram aquecidos pela placa, que era retirada para proceder a ligação. A ligação era efetuada com pressão até ao arrefecimento [56]. A **Figura 10** demonstra o processo adotado pelos autores.

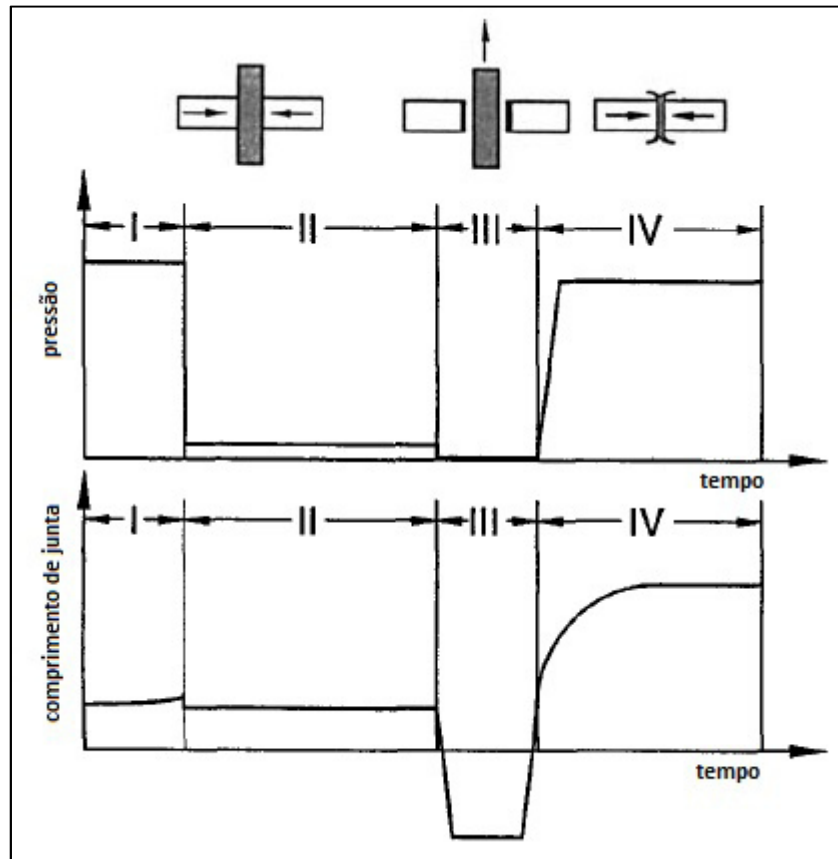


Figura 10 - Ligação por placa quente. Adaptado de [56]

Para além do processo referido anteriormente, podemos ainda falar de outro processo de ligação térmica emergente, que se trata da ligação utilizando laser. Esta tecnologia tem tido cada vez mais interesse por parte da indústria devido à redução dos custos inerentes ao processo. Knapp *et al.*, em 2010 estudaram um procedimento de soldadura por laser para compósitos de polipropileno reforçado. A **Figura 11** demonstra o tipo de junta utilizado pelos autores. Estes referem que principal dificuldade na soldadura de compósitos por laser é a difusão do feixe devido às fibras do compósito [18].

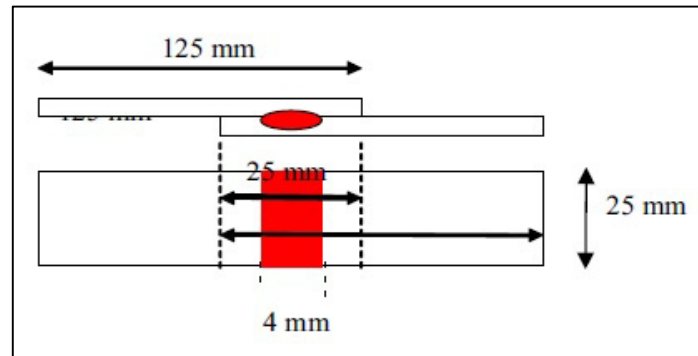


Figura 11 - Esquema de junta realizada por laser [18]

Os processos de ligação por fricção consistem na geração de calor na zona da junta através de movimento e pressão aplicada, seguida de arrefecimento e consolidação do compósito. Existem vários métodos para provocar o movimento dos componentes na junta, sendo por ultrassons, vibração ou rotação. Gonçalves *et al.* estudaram um processo de ligação por fricção para um compósito de poliamida reforçado com fibra de carbono. Este processo consistia na utilização de um pino, que ao rodar aquecia a zona a ligar e fazia uma soldadura por pontos [57]. A **Figura 12** demonstra o processo de ligação por fricção utilizado.

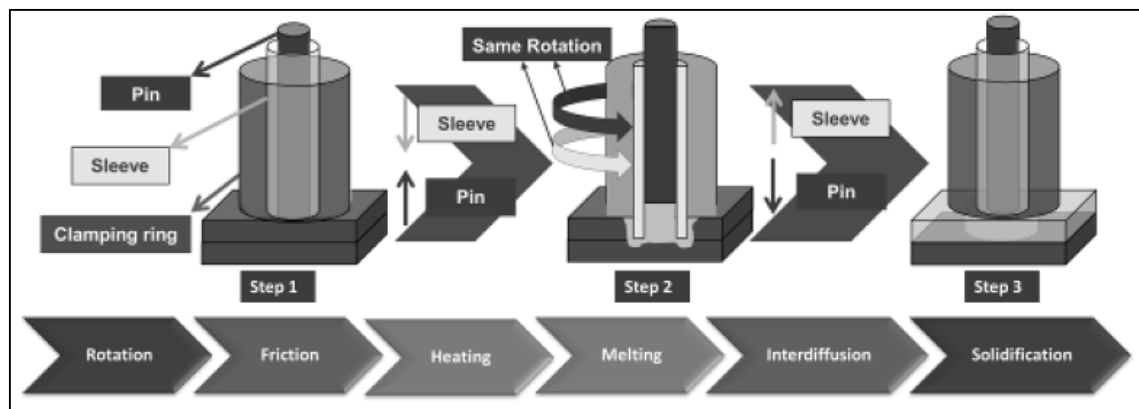
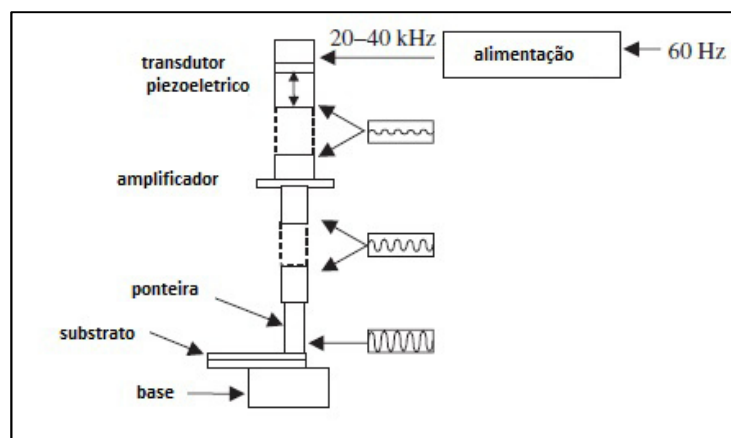


Figura 12 - Processo de ligação por fricção [57]

Villegas em 2014 estudou o processo de soldadura por ultrassons. Este procedimento é particularmente interessante pois permite soldar áreas bastante reduzidas, sendo também capaz de realizar ligações de forma sequencial para áreas grandes. Neste procedimento. Este está dividido em duas fases: a fase de vibração e a fase de solidificação. Na fase de vibração, é aplicada pressão e vibração de alta frequência (10 – 70 kHz) com baixa amplitude (10-250  $\mu\text{m}$ )[58]. A

**Figura 13** demonstra o processo.



**Figura 13 - Processo de soldadura por ultrassons [32]**

A ligação eletromagnética é o terceiro e último tipo de ligação soldada considerada [32]. Este tipo de ligações consiste na moldação de elementos metálicos, tais como óxidos de ferro e aço inoxidável, na matriz a ser ligada. Um campo magnético de alta frequência provoca o aquecimento destes elementos, o que por conseguinte aquece e derrete o polímero [32]. Posteriormente, e com aplicação de pressão, o polímero passa para a fase de difusão e as ligações são formadas [32].

Swanwatana *et al.* em 2005 desenvolveram um processo de soldadura por indução com aplicação de um filme de níquel na zona a ligar [19]. A **Figura 14** demonstra o processo utilizado pelos autores.

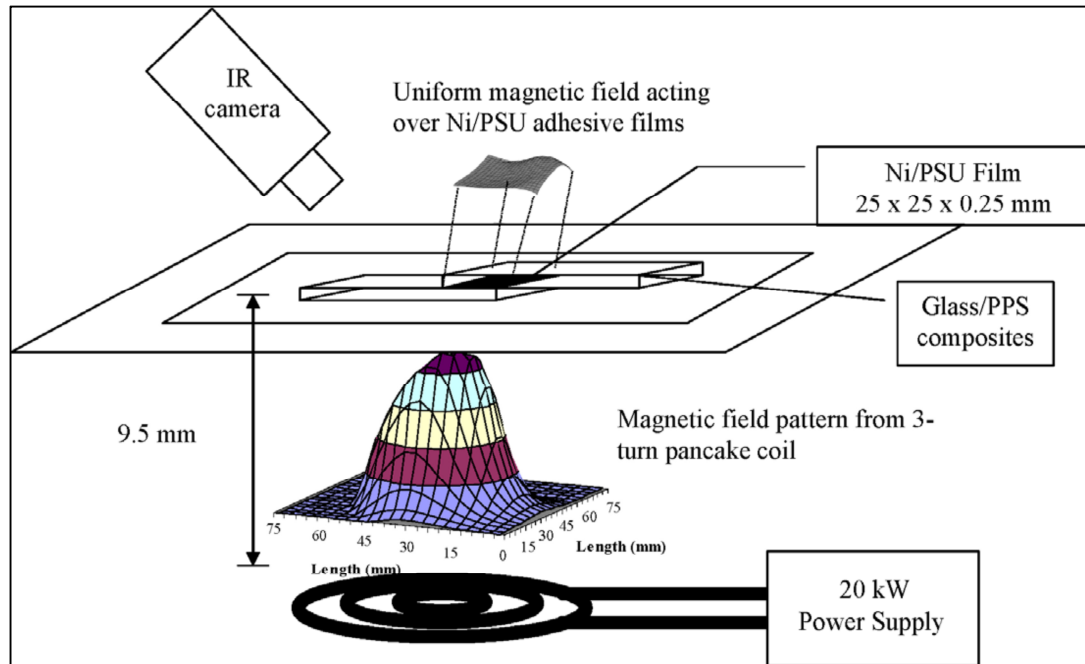


Figura 14 - Processo de soldadura por indução [19]

Todos estes tipos de soldadura são teoricamente aplicáveis aos compósitos termoplásticos, sendo que nestes é também necessário considerar as propriedades das fibras, nomeadamente a sua fração volúmica, uma vez que frações volúmicas muito elevadas podem criar juntas menos resistentes [17].

O processo de ligação soldada tem vantagens ao nível de simplicidade, dado que não necessita de preparação de superfície para a junção dos materiais, ao contrário dos adesivos estruturais. Uma vez que este tipo de processos derrete o termoplástico, após solidificação este forma uma junta uniforme, o que uniformiza as tensões aplicadas. Tem também vantagens ao nível de custo, uma vez que não necessita de adição de outros componentes ou materiais para ligação. As desvantagens deste processo prendem-se com a tecnologia utilizada para os realizar. Tal como é possível verificar nos parágrafos anteriores, este tipo de processos normalmente recorre a equipamentos dispendiosos para a sua realização, embora possa ainda ser simplificado.



# CONCEITOS E FORMULAÇÃO

## TEORICA

**3.1 Determinação de propriedades do material**

**3.2 Definição do processo de aquecimento**



### 3 Conceitos e Formulação Teórica

Ao longo do tópico é desenvolvida uma revisão dos principais conceitos teóricos utilizados no Capítulo 4 da presente dissertação. São abordados conceitos envolvidos ao estudo do processo de soldadura de compósitos de fibras contínuas e matriz termoplástica, o seu processo de aquecimento e consequente modelo utilizado. O tópico divide-se em dois subtópicos:

- Determinação de frações volúmicas do compósito e respetivas propriedades;
- Processo de aquecimento.

O primeiro subtópico aborda o método de estimar as propriedades de um material compósito com recurso à Lei das Misturas.

O segundo subtópico aborda o modelo de aquecimento deste tipo de junta, considerando os diferentes tipos de transferência de calor e processos de aquecimento. É referido também um método para definição de estágios de temperatura.

#### 3.1 Determinação de Propriedades do Material

Um dos elementos chave na análise de compósitos é a caracterização do volume relativo ou conteúdos mássicos dos vários materiais constituintes. Para qualquer número de constituintes num determinado material, a soma das suas frações volúmicas é igual a unidade [27]:

$$\sum_{i=1}^n v_i = 1 \quad (0.1)$$

Sendo,

$v_i$  = Fração volúmica do constituinte  $i$  no compósito

$v_i = \frac{V_i}{V_c}$ ; sendo  $V_i$  o volume do constituinte  $i$  e  $V_c$  o volume total do compósito.

Em casos mais simples, onde existe apenas uma matriz e um reforço (fibra), este somatório pode reduzir-se à seguinte equação [27]:

$$v_f + v_m + v_v = 1 \quad (0.2)$$

Em que,

$v_f$  = Fração volúmica de fibras;

$v_m$  = Fração volúmica de matriz;

$v_v$  = Fração volúmica de vazios.

Por analogia, podemos também adotar esta formulação à fração mássica de cada um dos constituintes [27].

$$\sum_{i=1}^n \omega_i = 1 \quad (0.3)$$

Onde,

$\omega_i$  = Fração mássica do constituinte  $i$  no compósito

$\omega_i = \frac{W_i}{W_c}$ , sendo  $W_i$  a massa do constituinte  $i$  e  $W_c$  a massa total do compósito.

Por analogia temos também:

$$\omega_f + \omega_m = 1 \quad (0.4)$$

Sendo,

$\omega_f$  = Fração mássica de fibras

$\omega_m$  = Fração mássica de matriz

**Nota:** neste caso não é considerada a fração mássica de vazios.

Utilizando agora as equações (1.3) e (1.4), procedendo à substituição da fração mássica de fibras pelo produto entre a densidade e a fração volúmica e resolvendo em ordem à densidade do compósito, temos [27]:

$$\rho_c = \sum_{i=1}^n \rho_i v_i \quad (0.5)$$

Em que,

$\rho_c$  = Densidade do compósito

$\rho_i$  = Densidade do constituinte  $i$

$v_i$  = Fração volúmica do constituinte  $i$

Este somatório pode também ser simplificado na equação designada por “Lei das Misturas”. Assumindo a inexistência de vazios, este método permite-nos estimar propriedades do material compósito, tais como densidade e condutibilidade térmica. Este tipo de análise pode também ser aplicado a outras propriedades físicas do material, desde que seja conhecida a propriedade no material constituinte [27].

$$\rho_c = \rho_f v_f + \rho_m v_m \quad (0.6)$$

Em que,

$\rho_c$  = Densidade do compósito

$\rho_f$  = Densidade da fibra

$\rho_m$  = Densidade da matriz

$v_m$  = Fração volúmica da matriz

$v_f$  = Fração volúmica de reforço

$$k_c = k_f v_f + k_m v_m \quad (0.7)$$

Em que,

$k_c$  = Condutibilidade térmica do compósito

$k_f$  = Condutibilidade térmica da fibra

$k_m$  = Fração volúmica da matriz

$v_m$  = Fração volúmica da matriz

$v_f$  = Fração volúmica de reforço

### 3.2 Definição do Processo de Aquecimento

A soldadura de compósitos de matriz termoplástica requer o conhecimento de parâmetros de aquecimento para a sua realização. Este tipo de parâmetros depende do meio onde é efetuado o procedimento, do tipo de transferência de calor associada ao mesmo e das propriedades dos materiais que constituem o compósito. Considerando que o processo de soldadura é efetuado num forno industrial ou mufla (tal como o utilizado no procedimento experimental do capítulo 4), e que a zona de soldadura tem uma sobreposição com espessura  $L$ , é possível determinar o coeficiente de transferência de calor por convecção natural através da equação que exprime o aquecimento por convecção natural transitória de uma placa horizontal no interior de um espaço confinado [59]:

$$\frac{h_c L_c}{k} = 0.54 \left[ \left( \frac{g \beta \Delta T L_c^3 \rho}{\eta^2} \right) \left( \frac{c_p \eta}{k} \right) \right]^{\frac{1}{4}} \quad (0.8)$$

Onde,

$L_c$  = ½ da espessura de sobreposição;

$k$  = condutibilidade térmica do ar;

$g$  = aceleração da gravidade;

$\beta$  = coeficiente de expansão volumétrica do ar, calculado por  $\frac{1}{T}$ ;

$\Delta T$  = diferença de temperaturas;

$\rho$  = a massa específica do ar;

$\eta$  = viscosidade do ar;

$C_p$  = calor específico do ar a pressão constante.

Seguidamente é também necessário calcular o coeficiente de transferência de calor por radiação ( $h_r$ ) através da equação que permite calcular as trocas de fluxo de calor por unidade de área entre um corpo e o seu meio envolvente, considerado como tendo dimensões consideravelmente superiores (forno) às do corpo considerado [60]:

$$\frac{q}{A_a} = \sigma_{sb} \varepsilon_m (T_h^4 - T^4) ; \quad (0.9)$$

Sendo,

$q$  = calor libertado;

$A_a$  = área efetiva exposta ao aquecimento;

$\sigma_{sb}$  = constante de Stefan-Boltzmann ( $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ );

$\varepsilon_m$  = emissividade do meio;

$T_h$  = temperatura absoluta do forno;

$T$  = temperatura absoluta do compósito.

Dividindo a equação pelo elemento  $(T_h - T)$ , reconhece-se no primeiro membro da equação o coeficiente de transferência de calor por radiação:

$$h_r = \frac{\sigma_{sb} \varepsilon_m (T_h^4 - T^4)}{(T_h - T)} \quad (0.10)$$

Sabendo agora os coeficientes de convecção e de radiação, é possível determinar o coeficiente total de transferência de calor,  $h_t$ , através da soma dos valores calculados:

$$h_t = h_r + h_c \quad (0.11)$$

Para determinar se é possível negligenciar as trocas de calor por condução, e se estamos no caso de estudo de uma condução transiente, é necessário calcular o número de Biot ( $Bi$ ). O número de Biot relaciona o coeficiente de transferência de calor do meio numa dimensão característica com o coeficiente de condução do sólido (compósito)[59]. É calculado através da equação (1.13).

$$Bi = \frac{h_t L_c}{k_c} \quad (0.12)$$

Sendo que,

$h_t$  = coeficiente de transferência de calor;

$L_c = \frac{1}{2}$  da espessura de sobreposição;

$k_c$  = condutibilidade térmica do polímero.

O tempo necessário para atingir uma determinada temperatura é calculado pelo número de Fourier ( $FO$ ). Este número, expressa uma quantidade adimensional de tempo, é calculado pela equação (1.14) [60].

$$FO = \frac{\alpha \cdot t}{L_c^2} \quad (0.13)$$

Em que,

$\alpha$  = difusibilidade térmica, calculado por  $\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$ ;

$t$  = tempo de aquecimento;

$L_c = \frac{1}{2}$  da espessura de sobreposição.

Dado que na expressão (1.14) não é conhecido o número de Fourier, este pode ser calculado pela seguinte equação [60]:

$$\frac{\theta}{\theta_i} = e^{-Bi \cdot FO} \quad (0.14)$$

Em que,

$\theta = (T_{amb} - T_{forno})$ , diferença de temperaturas entre temperatura ambiente e temperatura do meio de aquecimento (forno);

$\theta_i = (T_c - T_{forno})$ , diferença de temperaturas entre temperatura do compósito e temperatura do meio (forno);

$Bi$  = número de Biot;

$FO$  = número de Fourier.

Resolvendo a equação (1.15) em ordem ao número de Fourier, é possível substituir o mesmo na equação (1.14), que por sua vez pode ser resolvida em ordem a  $t$ . Visto isto, temos a seguinte equação para determinação do tempo:

$$t = \frac{\rho \cdot L_c \cdot c_p}{h_T} \cdot \ln \left[ \frac{(T_{forno} - T_{amb})}{(T_{forno} - T_c)} \right] \quad (0.15)$$

# PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

## **4.1 Procedimento Experimental para Soldadura**

- 4.1.1 Material utilizado
- 4.1.2 Cálculo dimensional da Junta
- 4.1.3 Determinação da temperatura e estágio de tempo
- 4.1.4 Ensaios realizados

## **4.2 Procedimento de Ligação por Adesivo Estrutural**

- 4.2.1 Preparação de superfície
- 4.2.2 Colagem de substratos e *tab's*
- 4.2.3 Ensaio de Provetes



## 4 Procedimento Experimental

### 4.1 Procedimento Experimental para Soldadura

O trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Fundição e no Laboratório de Ensaios Mecânicos do Instituto Superior de Engenharia do Porto. De forma a facilitar a compreensão da linha de raciocínio utilizada neste procedimento, foi desenvolvido o esquema apresentado na Figura 15. Este esquema descreve os procedimentos e cálculos necessários para obtenção dos parâmetros de soldadura, sendo que estes serão descritos com mais pormenor neste capítulo.

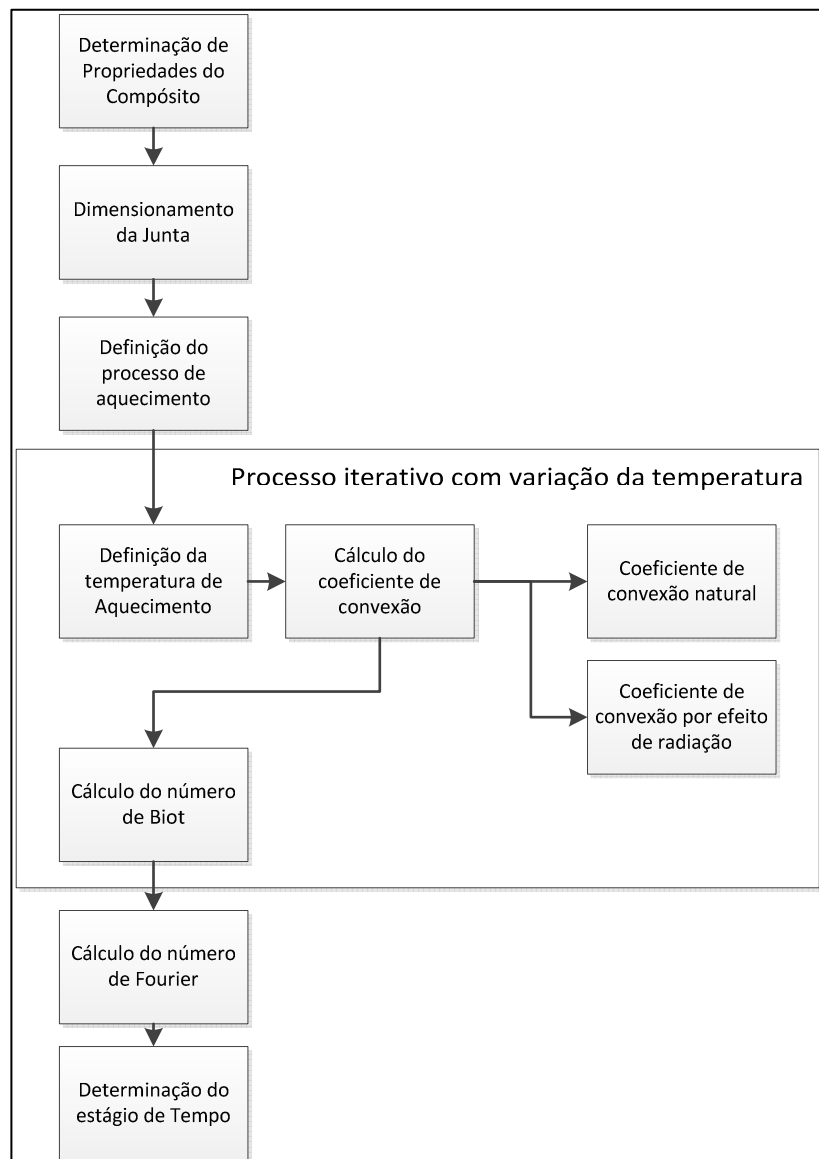


Figura 15 - Esquema para Procedimento Experimental

### 4.1.1 Material utilizado

O material utilizado no fabrico de juntas soldadas foi um compósito de fibras contínuas e alinhadas, sendo composto por polipropileno reforçado com fibra de vidro, apresentado na **Figura 16**. Este foi produzido através pultrusão, obtendo-se um perfil retangular com 20 mm de largura e 2 mm de espessura [61]. O compósito em estudo foi fabricado utilizando fibra de vidro tipo E com **2400 TEX da Owens Corning** e o polipropileno **Icorene 9184B P**. As propriedades do material compósito foram determinadas utilizando a Lei das Misturas (equações (1.6), (1,7) e (1,8)) [27].



**Figura 16 – Barra de fibra de vidro e polipropileno fabricada por pultrusão**

Neste cálculo, utilizando a fração volúmica de fibras de 55% do material, e seguindo as propriedades típicas dos materiais utilizados, obtiveram-se as propriedades apresentadas na **Tabela 3**[61].

**Tabela 3 – Propriedades calculadas do material compósito**

Propriedades	Polipropileno	Fibra de Vidro	Compósito
C <sub>p</sub> - Calor específico (J/kg.K)	1700	835	1267,5*
P – Massa volúmica (kg/m <sup>3</sup> )	886	2540	1796
K – Condutibilidade Térmica (W/m.K)	0,3 (pode variar entre 0,2 a 0,4)	1,3	0,85
Tensão de rotura (MPa)	30	3500	-
Tensão de rotura experimental (MPa)	19	1657	1060,8 ± 43,1

**Nota:** Dado não conseguir obter o calor específico do compósito, e uma vez que este valor interfere diretamente nos tempos de estágio, optou-se por considerar um valor intermédio entre a fibra de vidro e o polipropileno. Valores experimentais obtidos no procedimento experimental de Novo *et al.*[61]

#### 4.1.2 Cálculo dimensional da Junta

As juntas foram realizadas de acordo com o procedimento descrito pela norma ASTM D 1002[62]. Este procedimento permite determinar a tensão de corte aparente em adesivos quando testados numa junta de sobreposição simples. Na **Figura 17** está representado o dimensionamento de uma junta deste tipo.

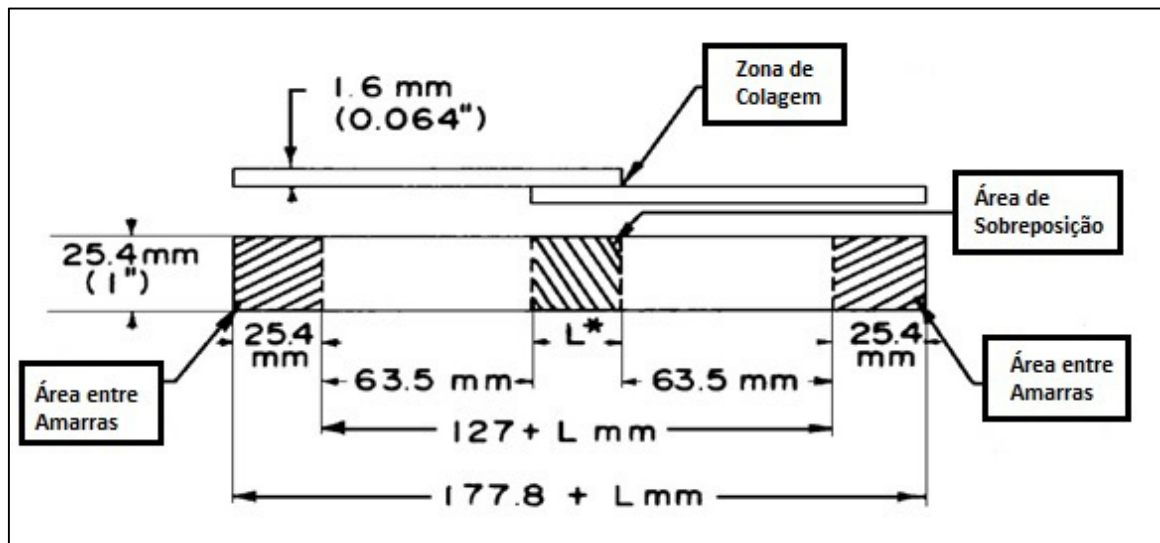


Figura 17. Dimensões e forma da junta. Adaptado de [62]

Utilizando os valores indicados pela norma ASTM D1002, e considerando que o processo de fabrico do substrato só permite produzir provetes com 20 mm de largura, procedeu-se à determinação da sobreposição equivalente.

A **Tabela 4** apresenta os valores considerados para o cálculo do comprimento de sobreposição equivalente. O valor calculado foi de 16,12 mm, que se considerou 16 mm para efeitos práticos. Para determinar o comprimento de cada substrato procedemos ao cálculo utilizando as medidas indicadas na **Figura 17**. Obteve-se o valor de 96,9 mm para comprimento do substrato, sendo considerado 97 mm para efeitos práticos.

Tabela 4 - Determinação de dimensões da junta

Tipo de provete	Área de sobreposição (mm <sup>2</sup> )	Comp. Sobreposição (mm)	Largura de Sobreposição (mm)	Comp. Junta (mm)	Comp. Substrato
Provete Norma	322,58	12,7 ± 0,25	25,4	190,5	95,3
Provete Ensaio	322,58	<b>16,12</b>	20	193,8	<b>96,9</b>

#### 4.1.3 Determinação da temperatura e estágio de tempo

A determinação da temperatura de junção dos substratos e do estágio de tempo necessário para os unir foi realizada com recurso a um modelo de transferência de calor. Este modelo obedeceu aos seguintes pressupostos:

- Sistema em convexão natural;
- Desprezada a transferência de calor entre o molde e os provetes;
- O comprimento considerado corresponde ao comprimento de sobreposição;
- Temperatura inicial de cálculo de **500 K**, correspondente à temperatura de fusão do polipropileno com uma majoração de **30%**.

Considerando as condições anteriores, o modelo de transferência de calor pode ser dividido em três componentes de cálculo, de forma a determinar as variáveis dos ensaios.

As componentes a calcular foram as seguintes:

- Coeficiente de convexão do sistema;
- Número de Biot;
- Estágio de tempo.

Para o cálculo do coeficiente de convexão do sistema é necessário conhecer o coeficiente de convexão natural e o coeficiente de convexão por efeito de radiação. O coeficiente de convexão natural do sistema,  $h_c$ , foi calculado a partir da equação (0.8), obtendo-se o valor de **9,08 W/m<sup>2</sup>.K**. Para este cálculo foram utilizados os valores contidos na **Tabela 5**.

Tabela 5 - Propriedades para cálculo do coeficiente de convecção natural

Propriedade	$L_c$ (m)	$k$ (W/m.kg)	$g$ (m/s <sup>2</sup> )	$\beta$ (1/K)	$\Delta T$ (K)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\eta$ (N.s/m <sup>2</sup> )	$C_p$ (J/kg.K)
Valor	0,004	0,0412	9,8	0,0020	10	1,29	3,03E <sup>-5</sup>	972

Definido o coeficiente de convecção natural, foi então necessário calcular o coeficiente de transferência de calor devido ao efeito da radiação utilizando a equação (1.10). O coeficiente de transferência de calor calculado foi de **11,19 W/m<sup>2</sup>**, sendo os valores considerados para cálculo os indicados na **Tabela 6**. O coeficiente de convecção total do sistema obtém-se pela soma dos dois coeficientes calculados, utilizando a equação (1.10), sendo o seu valor **20,27 W/m<sup>2</sup>.K**.

Tabela 6 - Parâmetros para cálculo de convecção por efeito de radiação

Propriedade	$\sigma_{sb}$ (W/m <sup>2</sup> .K <sup>4</sup> )	$\varepsilon_m$ (-)	$T_h$ (K)	$T$ (K)
Valor	0,004	0,7	510	500

De forma a determinar a possibilidade de desprezar as trocas de calor por condução, e assim verificar se estamos num processo de condução transiente, foi calculado o valor do número de Biot, utilizando a expressão (1.11) [60]. Para cálculo deste número foram utilizados os valores indicados na **Tabela 7**. O valor de Biot calculado é de 0,095, sendo que a bibliografia indica que, para valores menores que 0,1, todo o corpo aquece à mesma velocidade, sendo desprezável o efeito da condução [60].

Tabela 7 - Dados para cálculo do número de Biot

Propriedade	$h_t$ (W/m <sup>2</sup> .K)	$L_c$ (m)	$k_c$ (W/m.K)
Valor	20,27	0,004	0,85

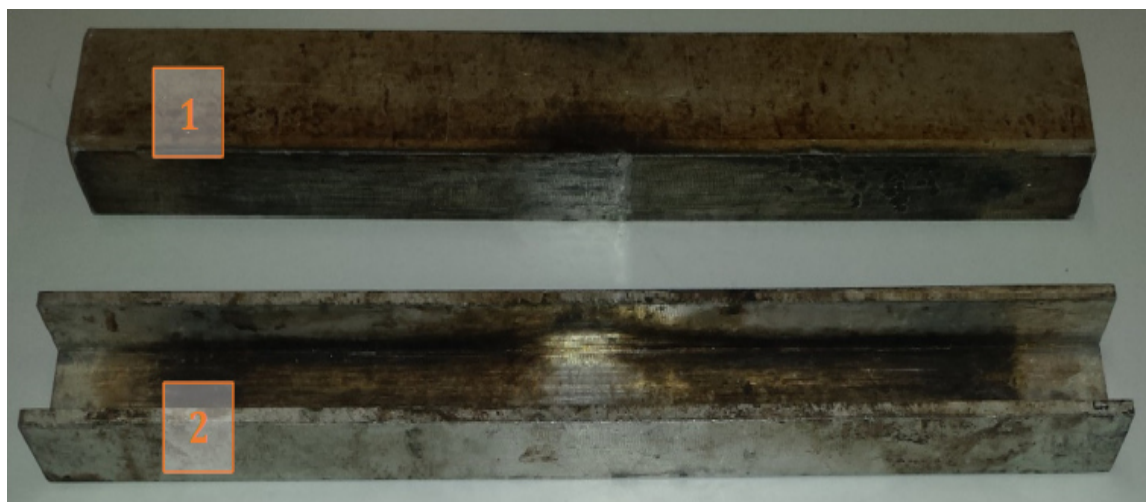
O tempo de estágio necessário para a produção dos provetes é calculado pelo número de Fourier, utilizando a equação (1.14). As propriedades e coeficientes considerados para o cálculo encontram-se na **Tabela 8**.

**Tabela 8 - Dados para cálculo do tempo de estágio**

Propriedade	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_p$ (J/kg.K)	$h_c$ (W/m <sup>2</sup> .K)	$T_{forno}$ (K)	$T_{amb}$ (K)	$T_c$ (K)
Valor	1796	1224	20,27	510	298,15	500

O valor de tempo obtido neste cálculo foi de **1297** segundos. Isto significa que, para elevar a temperatura do material compósito a uma temperatura de 500 K, necessitamos de um estágio de temperatura de **1297** segundos à temperatura de forno de 510 K.

As juntas foram realizadas de acordo com o procedimento descrito na norma ASTM D1002 [62]. Para produção dos provetes foi utilizado um molde em alumínio composto por um bloco (1) e uma calha molde (2). Para comprimir e auxiliar a junção dos dois substratos, foi utilizado o bloco (1). No interior da calha molde (2) foram posicionados os substratos com a sobreposição ponderada (16 mm). O aquecimento da junta foi efetuado no interior de uma mufla da marca Nabertherm® com temperatura máxima 3000°C e erro de  $\pm 4^\circ\text{C}$  (Figura 19). Este forno não possui sistema de circulação de ar interior, estando assim perante um sistema de convexão natural.



**Figura 18 - Molde para produção de provetes através de soldadura (1-Bloco 2-Molde)**



Figura 19- Mufla Nabertherm®

#### 4.1.4 Ensaio realizados

Neste tópico descrevem-se todos os parâmetros e métodos de ensaio utilizados para teste da junta soldada de material compósito. A primeira consideração a ter é a diferenciação dos estágios de temperatura na produção da junta. Dado que dimensionalmente as juntas são iguais, optou-se por trabalhar os valores de tempo e temperatura de aquecimento. Para isto, e tal como demonstrado no tópico anterior, procedemos ao cálculo de diferentes tempos de estágio, variando a temperatura do forno. De forma a avaliar o efeito da temperatura, e visto que consideramos a temperatura de 510 K como a temperatura mínima para existir fusão completa do polímero, procedemos a incrementos de 15% e 30%. Os valores obtidos foram 550 K e 590 K, respetivamente. Para avaliar o efeito do tempo de estágio, este foi calculado para cada temperatura o tempo respetivo, bem como feita uma variação de  $\pm 15\%$  ao tempo de estágio. Os valores finais são apresentados na **Tabela 9**.

Tabela 9 - Quadro de estágios de temperatura e tempos a aplicar

Temperatura (K)	Tempo calculado (min)	Tempo majorado +15% (min)	Tempo reduzido -15% (min)
510 (valor base)	22	25	19
550 (+15%)	13	15	11
590 (+30%)	8	9	7

Seguidamente procedeu-se ao ensaio de tração dos provetes, tendo como base a norma ASTM D1002. Para isto, foi utilizado o equipamento **Shimadzu AGS-X (Figura 20)**. Os dados do ensaio foram obtidos utilizando o *software Trapezium X*<sup>®</sup>, que permite controlar os parâmetros a aplicar pelo equipamento, bem como registar os valores de força e deslocamento. O teste dos provetes foi realizado com os seguintes parâmetros:

- Distância entre amarras: 115 mm;
- Velocidade de ensaio: 2 mm/min;
- Célula de carga: 100 kN.

Foram testadas, para cada condição de ensaio, cinco juntas com os valores indicados na **Tabela 9**. A cada ensaio foram registados os valores de comprimento e largura de sobreposição dos provetes, bem como a força máxima que a junta suportou antes da rotura.



Figura 20 - Equipamento de ensaio de tração Shimadzu AGS-X®

#### 4.2 Procedimento de Ligação por Adesivo Estrutural

No intuito de comparar a eficácia das ligações soldadas face a outro processo de ligação mais usual, foram realizados ensaios de teste utilizando um adesivo estrutural. Neste procedimento foram utilizados substratos com a mesma dimensão dos substratos soldados, onde foi aplicado o adesivo estrutural **3M-DP8005**, cuja folha técnica se encontra no **Anexo I**. O processo de ligação utilizando adesivo estrutural foi dividido nas seguintes fases:

- Preparação das superfícies;
- Colagem de substratos e *tab's*;
- Ensaio de provetes.

##### 4.2.1 Preparação de superfície

O material utilizado como substrato para ensaio é o mesmo já aplicado nas colagens anteriores. Este material, devido às suas características químicas, é um material com pouca adesão [63]. Isto levou a que fossem realizados ensaios com e sem tratamento de superfície. Foram realizados três tipos de preparação, descritos na **Tabela 10**.

Para o processo de limpeza foi utilizada acetona como solvente. No processo de lixagem recorreu-se a lixa para ferro FE 100, sendo que no processo de granalhagem optou-se pelo uso de granalha de alumina.

Tabela 10 - Preparações de superfície

	Tratamento 1	Tratamento 2	Tratamento 3
Limpeza	X	X	X
Lixagem		X	
Granalhagem			X

#### 4.2.2 Colagem de substratos e tab's<sup>3</sup>

A produção dos provetes foi realizada com base nos valores da **Tabela 4**. Os substratos foram colados com recurso a um gabari de apoio, de modo a garantir o correto posicionamento dos mesmos, sendo posteriormente foram fixados com molas e removidos eventuais excessos de aplicação de adesivos (**Figura 21**). De modo a garantir a cura completa do adesivo, este foi deixado em repouso durante uma semana previamente a ser ensaiado. Foram realizados cinco exemplares por tratamento de superfície, utilizando o mesmo adesivo e *gabari*, totalizando quinze provetes para ensaio.

#### 4.2.3 Ensaio de Provetes

De forma a garantir a relevância estatística do ensaio de juntas adesivas relativamente ao procedimento de soldadura, a parametrização do ensaio, relativamente a distância entre amarras e velocidade de ensaio foi a definida no tópico **3.1.4**. Os valores registados foram o comprimento de sobreposição, a força máxima aplicada e o deslocamento, sendo os valores finais registados através do *software* referido anteriormente.



Figura 21 - Proвете de ligação adesiva

<sup>3</sup> Tab: Elemento utilizado para reforçar a zona onde o provete é fixo pelas amarras.



# RESULTADOS E DISCUSSÃO

## **5.1 Apresentação de resultados**

- 5.1.1 Provetes de Soldadura à temperatura de 510 K
- 5.1.2 Provetes de soldadura à temperatura de 550 K
- 5.1.3 Provetes de soldadura à temperatura de 590 K
- 5.1.4 Provetes de ligação adesiva

## **5.2 Discussão de resultados**

## **5.3 Considerações Finais e Sugestões para trabalhos Futuros**





## 5 Resultados e Discussão

### 5.1 Apresentação de resultados

Os ensaios realizados e registados através do *software Trapezium X®* permitiram a realização de curvas de Tensão de Corte VS. Deslocamento, de forma a avaliar a performance das juntas. Estas curvas são apresentadas no **Anexo II**, bem como os valores de força, deslocamento e tensão de corte calculada. No procedimento experimental de soldadura não foi considerado o efeito da pressão na obtenção da junta. Devemos também ter em consideração que a temperatura e tempo de estágio são variáveis que dependem entre si, tal como é possível verificar pela teoria do capítulo 3.

#### 5.1.1 Provetes de Soldadura à temperatura de 510 K

Tal como definido pelo procedimento experimental para soldadura, foram realizados quinze provetes à temperatura de **510 K**, variando o tempo de estágio. A **Tabela 11** apresenta os valores obtidos após cálculo da tensão de corte, sendo também referidos os valores médios para cada tempo de estágio e o desvio padrão associado. O valor máximo obtido para esta temperatura verificou-se no **proвете 3** do ensaio de **25 minutos**, onde se atingiu a tensão de corte máxima de **23,24 MPa**. Verificou-se também que, entre os três estágios de tempo, o ensaio de 25 minutos apresentou a tensão de corte média mais elevada, sendo também este o ensaio com menor desvio padrão associado (**2,79 MPa**).

**Tabela 11 - Tensão de corte por ensaio para temperatura de 510 K**

Proвете	19 Min @ 510 K (MPa)	22 Min @ 510 K (MPa)	25 Min @ 510 K (MPa)
1	18,98	20,48	19,82
2	19,31	22,01	23,11
3	19,43	19,81	<b>23,24</b>
4	13,14	11,75	20,54
5	6,19	14,60	16,45
<b>Tensão Média</b>	15,41	17,73	<b>20,63</b>
<b>Desvio Padrão</b>	5,80	4,36	<b>2,79</b>

A **Figura 22** apresenta um gráfico com respetivos desvios padrão. Neste gráfico é possível verificar uma tendência de aumento da tensão de corte média dos provetes com o incremento de tempo de estágio. Visto isto, e de forma a verificar se essa tendência se mantinha, procedemos a um ensaio adicional com um tempo superior. O estágio de tempo escolhido para verificação de tendência foi de 28 min a 510K.

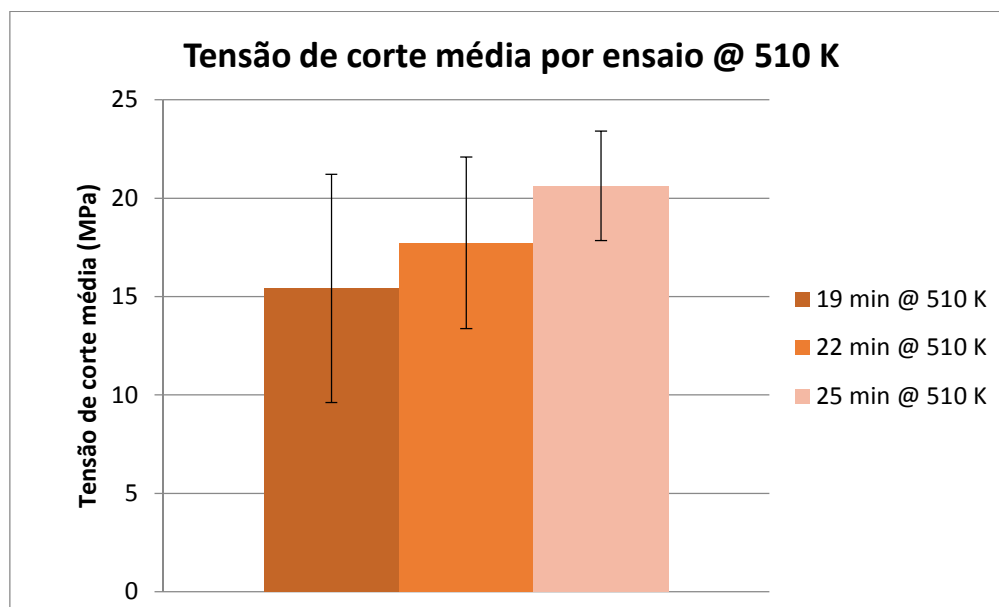


Figura 22 - Tensão de corte média por ensaio @ 510 K

Os valores obtidos neste ensaio podem ser verificados na **Tabela 12** em conjunto com os resultados dos ensaios originais. Verifica-se uma redução na tensão de corte média, que se ficou pelos **18,94 MPa**, sendo o desvio padrão associado de **1,29 MPa**. Com estes dados procedeu-se à realização de um novo gráfico de tensão de corte média por ensaio, apresentado na **Figura 23**.

Tabela 12 - tensão de corte para ensaios a 510 K com verificação de tendência

Proвете	28 Min @ 510 K (MPa)
1	18,05
2	17,26
3	19,66
4	20,51
5	19,22
<b>Tensão Média</b>	<b>18,94</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>1,29</b>

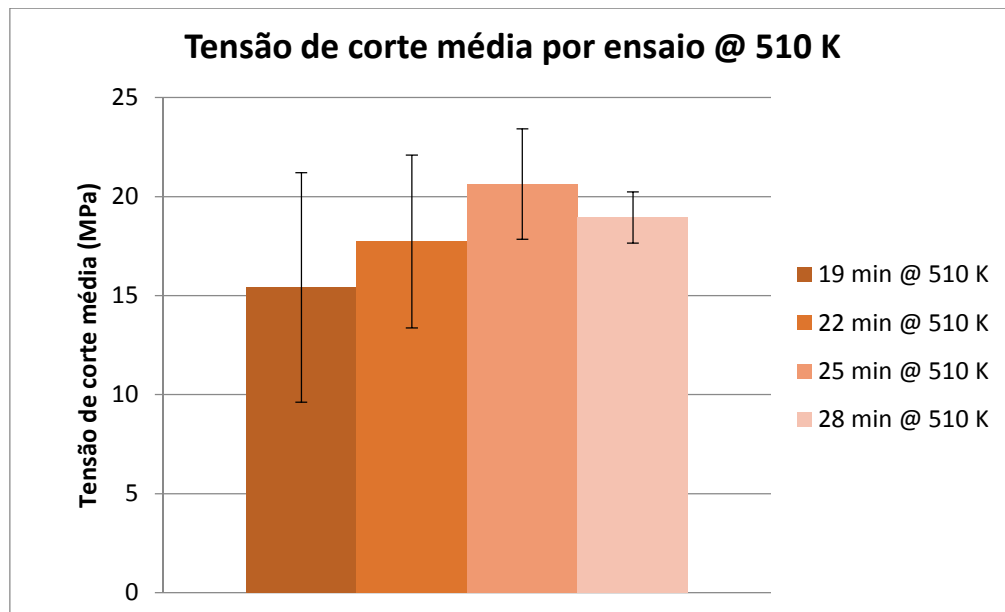


Figura 23- Tensão de corte média por ensaio @ 510 K com verificação de tendência

Com os resultados de todos os ensaios realizados para a temperatura de 510 K, e utilizando novamente a tensão de corte média como elemento de comparação entre os mesmos, foi efetuado um gráfico com a linha de tendência resultante, representado na **Figura 24**. Ao determinar o máximo da função obtida pelo gráfico, podemos concluir que o tempo ótimo para obter a tensão de corte mais elevada é de aproximadamente **26 minutos**.

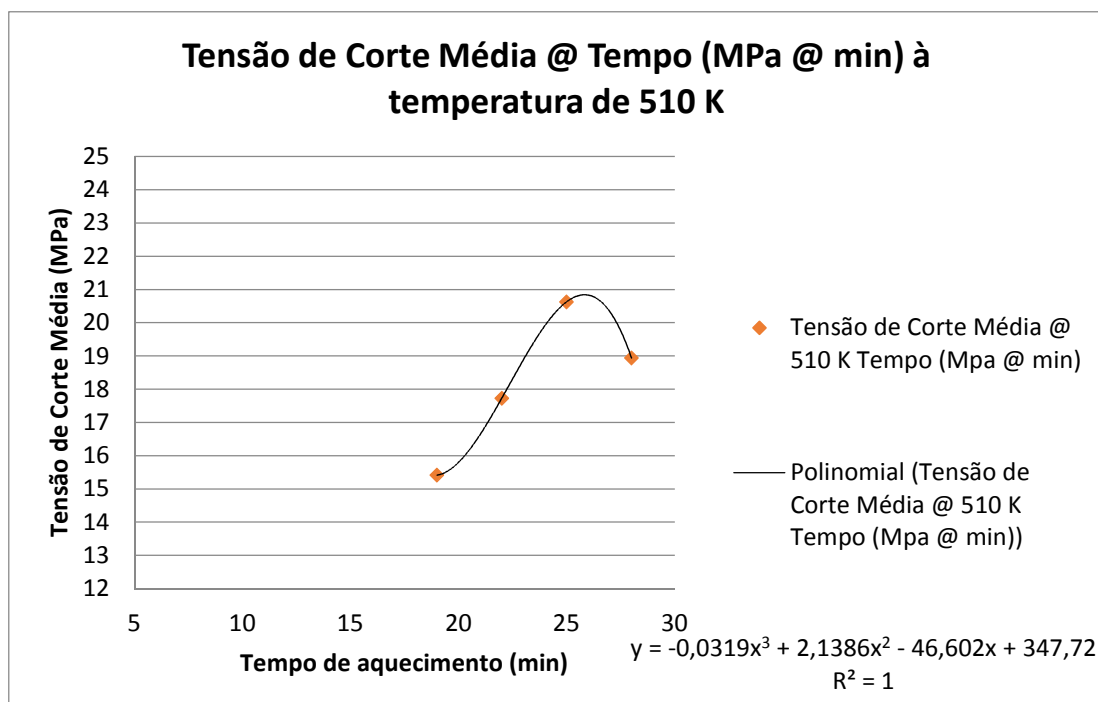


Figura 24 - Linha de tendência para ensaios a 510 K

### 5.1.2 Provetes de soldadura à temperatura de 550 K

À semelhança do ensaio a 510 K, e cumprindo com os parâmetros definidos para este procedimento experimental, foram realizados quinze ensaios à temperatura de **550 K**, variando o tempo de estágio. A **Tabela 13** apresenta os valores obtidos após cálculo da tensão de corte, sendo também referidos os valores médios para cada tempo de estágio e o desvio padrão associado. O valor máximo obtido para esta temperatura verificou-se no **proвете 2** do ensaio de **15 minutos**, onde se atingiu a tensão de corte máxima de **21,59 MPa**. Verificou-se também que, entre os três estágios de tempo, o ensaio de 11 minutos apresentou a tensão de corte média mais elevada, sendo também este o ensaio com menor desvio padrão associado (**2,31 MPa**). Este ensaio teve a particularidade de, no ensaio com o tempo de 11 minutos a 550 K, o provete 1 ter sofrido de escorregamento nas amarras, não sendo possível levar o mesmo à rotura. A **Figura 22** apresenta um gráfico com respetivos desvios padrão. Neste gráfico é possível verificar uma tendência de diminuição da tensão de corte média com o aumento do tempo. Visto isto, procedemos à realização de um ensaio com um tempo reduzido, que neste caso foi de 9 min a 550 K.

**Tabela 13 - Provetes de soldadura à temperatura de 550 K**

Proвете	11 Min @ 550 K (MPa)	13 Min @ 550 K (MPa)	15 Min @ 550 K (MPa)
1	-	14,96	12,81
2	20,50	20,40	<b>21,59</b>
3	17,91	19,67	5,39
4	14,91	17,91	11,66
5	18,48	10,05	12,63
<b>Tensão Média</b>	<b>17,95</b>	16,60	12,82
<b>Desvio Padrão</b>	<b>2,31</b>	4,22	5,78

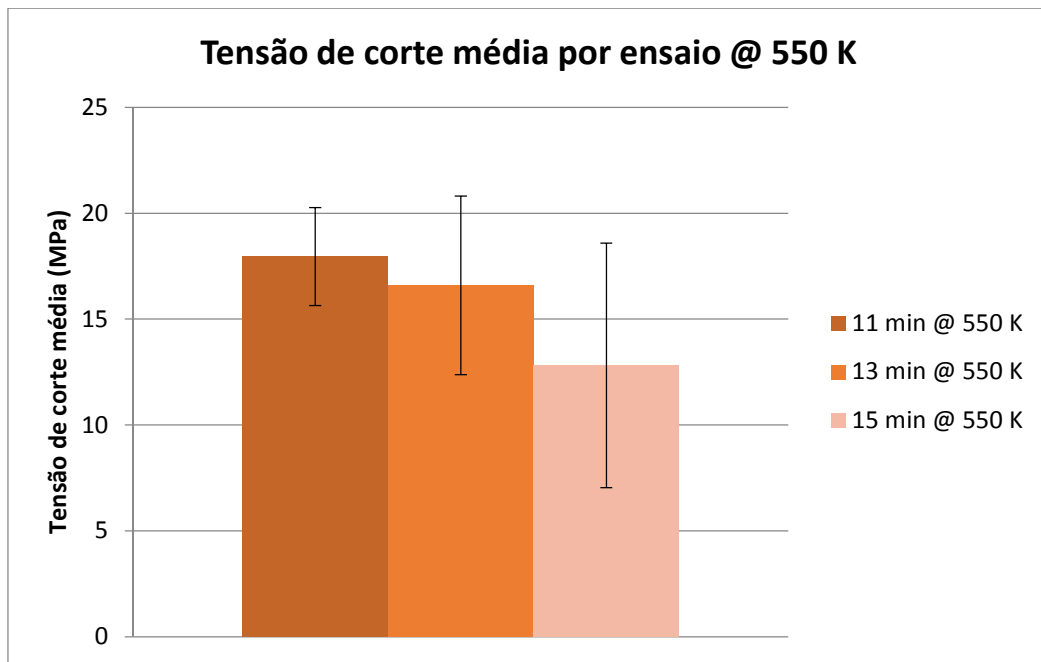


Figura 25- Tensão de corte média por ensaio @ 550 K

Os valores obtidos no ensaio podem ser verificados na **Tabela 14** em conjunto com os resultados dos ensaios originais. Verifica-se uma redução na tensão de corte média, que se ficou pelos **16,10 MPa**, sendo o desvio padrão associado de **1,58 MPa**. Com estes dados procedeu-se à realização de um novo gráfico de tensão de corte média por ensaio, apresentado na **Figura 26**.

Tabela 14 - Provetes de soldadura à temperatura de 550 K com verificação de tendência

Proвете	9 Min @ 550 K (MPa)
1	16,51
2	15,00
3	17,07
4	17,94
5	14,02
<b>Tensão Média</b>	<b>16,10</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>1,58</b>

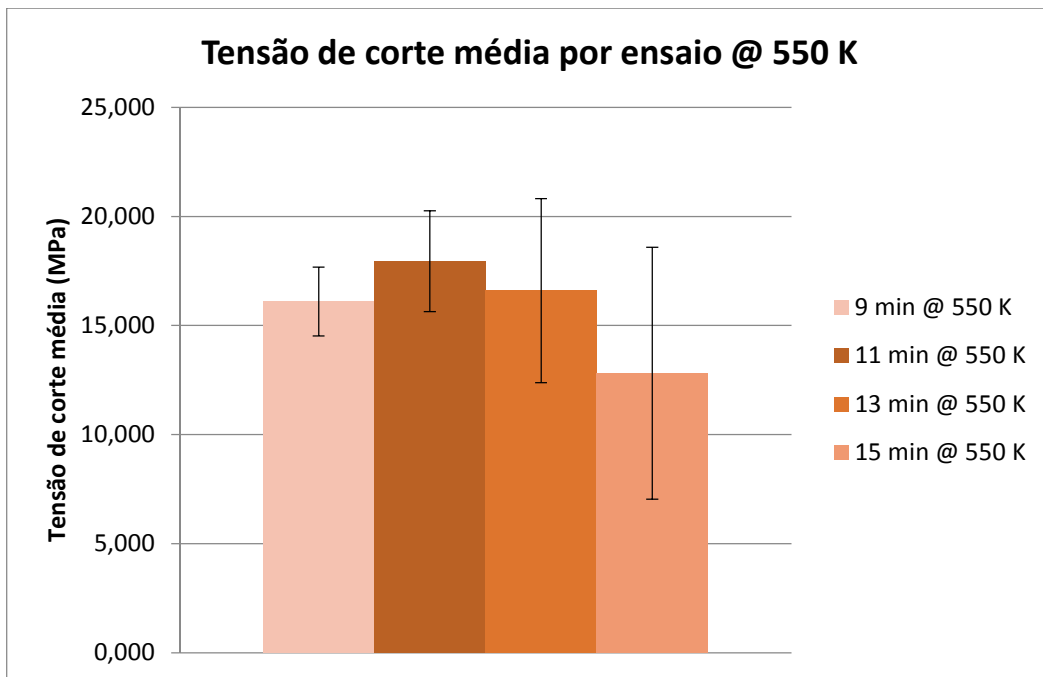


Figura 26 - Tensão de corte média por ensaio @ 550 K com verificação de tendência

Com os resultados de todos os ensaios realizados para a temperatura de 550 K, e utilizando novamente a tensão de corte média como elemento de comparação entre os mesmos, foi efetuado um gráfico com a linha de tendência resultante, representado na **Figura 27**. Ao determinar o máximo da função obtida pelo gráfico, podemos concluir que o tempo ótimo para obter a tensão de corte mais elevada é de aproximadamente **11 minutos**.

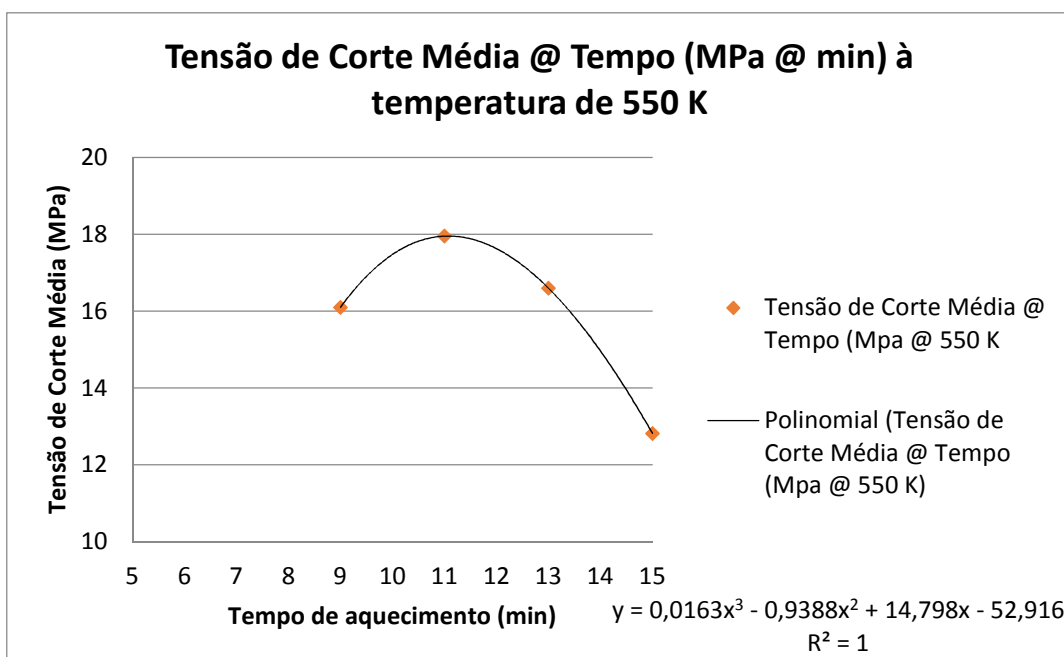


Figura 27 - Linha de tendência para ensaios a 550 K

### 5.1.3 Provetes de soldadura à temperatura de 590 K

Seguindo o procedimento experimental, foram realizados quinze ensaios à temperatura de **590 K**, variando o tempo de estágio. A **Tabela 15** apresenta os valores obtidos após cálculo da tensão de corte, sendo também referidos os valores médios para cada tempo de estágio e o desvio padrão associado. O valor máximo obtido para esta temperatura verificou-se no **proвете 5** do ensaio de **9 minutos**, onde se atingiu a tensão de corte máxima de **24,05 MPa**. Verificou-se também que, entre os três estágios de tempo, o ensaio de 9 minutos apresentou a tensão de corte média mais elevada, sendo o ensaio de 8 minutos o com menor desvio padrão associado (**3,10 MPa**). A **Figura 28** apresenta um gráfico com respectivos desvios padrão. Neste gráfico é possível verificar uma tendência de aumento da tensão de corte média com o aumento do tempo. Visto isto, procedemos à realização de um ensaio com um tempo aumentado, que neste caso foi de 10 min a 590 K.

**Tabela 15 - Provetes de soldadura à temperatura de 590 K**

Proвете	7 Min @ 590 K (MPa)	8 Min @ 590 K (MPa)	9 Min @ 590 K (MPa)
1	12,59	16,89	19,16
2	14,69	14,17	17,37
3	16,69	14,78	16,72
4	8,03	17,99	11,66
5	17,35	21,96	<b>24,05</b>
<b>Tensão Média</b>	13,87	17,16	17,79
<b>Desvio Padrão</b>	3,76	<b>3,10</b>	4,47

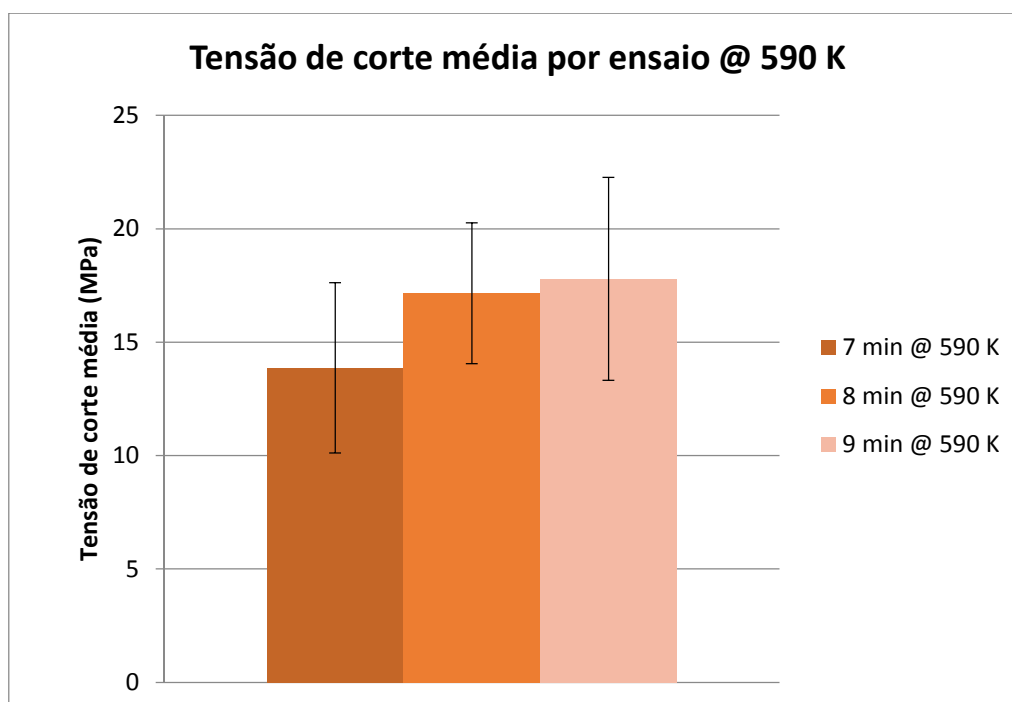


Figura 28 - Tensão de corte média por ensaio @ 590 K

Os valores obtidos no ensaio podem ser verificados na **Tabela 14** em conjunto com os resultados dos ensaios originais. Verifica-se uma redução na tensão de corte média, que se ficou pelos **16,10 MPa**, sendo o desvio padrão associado de **1,58 MPa**. Com estes dados procedeu-se à realização de um novo gráfico de tensão de corte média por ensaio, apresentado na **Figura 26**.

Tabela 16 - Provetes de soldadura à temperatura de 550 K com verificação de tendência

Provete	10 Min @ 590 K (MPa)
1	13,10
2	16,50
3	13,60
4	16,32
5	14,55
<b>Tensão Média</b>	<b>14,81</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>1,55</b>

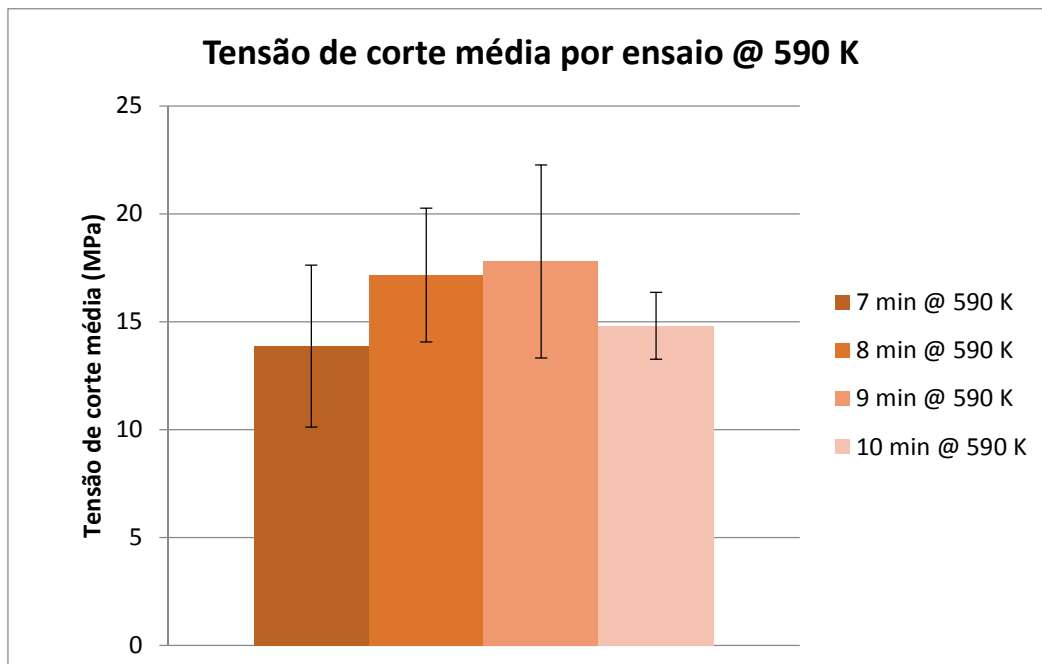


Figura 29 - Tensão de corte media por ensaio @ 590 K com verificação de tendência

Com os resultados de todos os ensaios realizados para a temperatura de 590 K, e utilizando novamente a tensão de corte média como elemento de comparação entre os mesmos, foi efetuado um gráfico com a linha de tendência resultante, representado na **Figura 30**. Ao determinar o máximo da função obtida pelo gráfico, podemos concluir que o tempo ótimo para obter a tensão de corte mais elevada é de aproximadamente **8 minutos**.

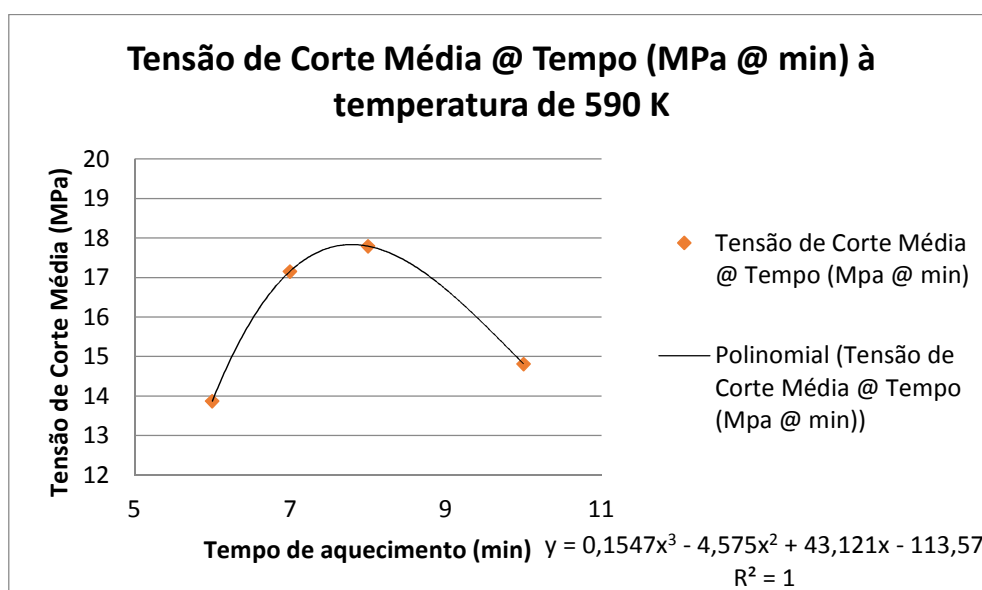


Figura 30 - Linha de tendência para ensaios a 590 K

#### 5.1.4 Provetes de ligação adesiva

Tal como definido pelo procedimento experimental da norma ASTM D1002, foram realizados quinze provetes com diferentes tratamentos de superfície [62]. A **Tabela 17** apresenta os valores obtidos após cálculo da tensão de corte, sendo também referidos os valores médios para cada tratamento e o desvio padrão associado. O valor máximo obtido verificou-se no **provete 1** do ensaio de **granalhagem**, onde se atingiu a tensão de corte máxima de **8,63 MPa**. O ensaio de granalhagem apresentou a tensão de corte média mais elevada, sendo também este o ensaio com menor desvio padrão associado (**0,29 MPa**). A **Figura 31** apresenta um gráfico de tensão de corte média com o desvio padrão associado a cada ensaio.

Tabela 17 - Provete de ligação adesiva

Provete	Granalhagem (MPa)	Lixagem (MPa)	Limpeza (MPa)
1	8,63	5,98	7,39
2	8,18	7,01	7,28
3	8,19	6,54	6,18
4	8,01	6,95	8,05
5	8,64	6,85	7,31
<b>Tensão Média</b>	8,33	6,67	7,24
<b>Desvio Padrão</b>	<b>0,29</b>	0,42	0,67

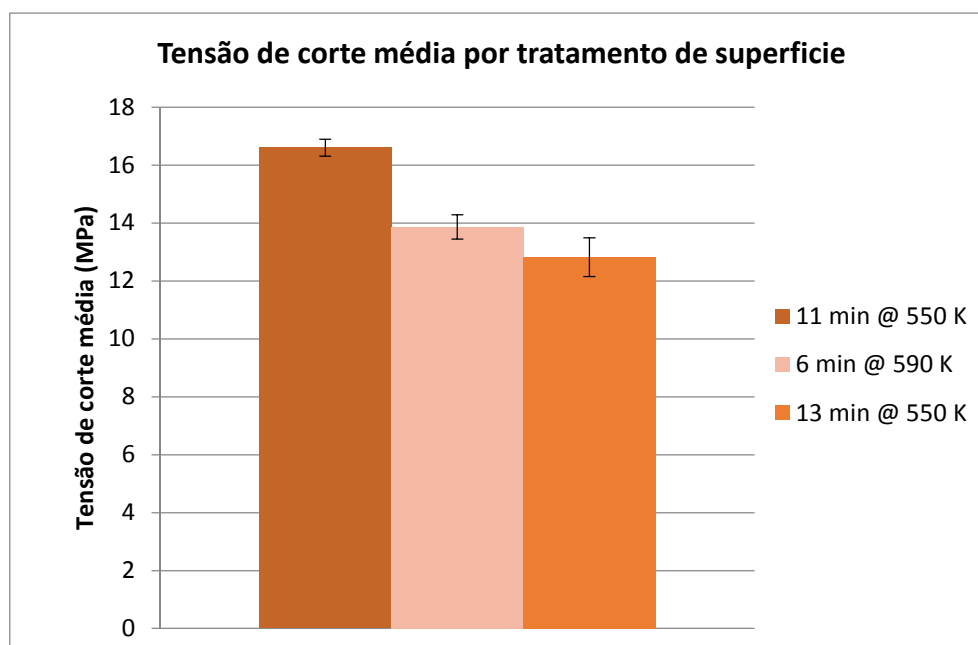


Figura 31 - Tensão de corte média por tratamento de superfície

## 5.2 Discussão de resultados

Os valores de Tensão de Corte Máxima para cada ensaio individual e Tensão de Corte Média para cada condição de ensaio encontram-se a seguir, na **Tabela 18**.

A partir da análise da **Tabela 18**, verificou-se que, num total de 60 observações, as ligações realizadas à temperatura de 510 K e com o tempo de estágio de 25 min apresentam o valor médio de 20,63 MPa, sendo este o valor médio mais elevado. Relativamente às ligações realizadas à temperatura de 550 K e com tempo de estágio de 15 min, estas apresentam o valor médio mais baixo de todos os ensaios, sendo este 12,82 MPa. Assim sendo, verifica-se inicialmente que o estágio com temperatura mais reduzida possibilita a obtenção de tensão de corte mais elevada em 37,86%, e, por conseguinte, uma junta mais resistente.

Visto não existir bibliografia relativa a este processo de soldadura, o autor optou por comparar o método descrito na presente dissertação, com outros métodos para o mesmo tipo de material. Comparativamente com os valores obtidos por Friedrich & Hou com o processo de soldadura por resistência, em que o valor máximo obtido para tensão de corte é de 10,12 MPa [64]. Comparativamente com o processo utilizado por Jandali *et al.*, que realizaram ligações através de vibração, estes obtiveram o valor máximo para tensão de corte de 13,8 MPa [65]. É então possível concluir que mesmo nas condições menos favoráveis de processamento, a soldadura de polipropileno reforçado com fibra de vidro, utilizando o procedimento desenvolvido nesta dissertação, é capaz de produzir juntas com tensão de corte mais elevada. Comparativamente ao processo de Friedrich & Hou, a tensão de corte é superior em 50,95%, sendo que relativamente ao processo de Jandali *et al.* se verifica um aumento de 33,11%.

Comparando a média dos valores médios para cada gama de temperaturas, verificamos que a temperatura de 510 K obtém o valor mais elevado de 18,18 MPa. É possível então concluir que para este tipo de procedimento, temperaturas mais reduzidas e com tempos de processamento mais elevados permitem obter juntas mais resistentes.

Tabela 18 - Tensão de Corte Máxima e Tensão de corte Média por ensaio realizado

Tensão de Corte Máxima (MPa)												
Provete	Estágio de Temperatura (min @ 510K)				Estágio de Temperatura (min @ 550 K)				Estágio de Temperatura (min @ 590 K)			
	19 min @ 510 K	22 min @ 510 K	25 min @ 510 K	28 min @ 510 K	11 min @ 550 K	13 min @ 550 K	15 min @ 550 K	9 min @ 550 K	7 min @ 590 K	8 min @ 590 K	9 min @ 590 K	10 min @ 590 K
1	18,98	20,48	19,82	18,05	-	14,96	12,81	16,51	12,59	16,89	19,16	13,10
2	19,31	22,01	23,11	17,26	20,50	20,40	21,59	15,01	14,69	14,17	17,37	16,50
3	19,43	19,81	23,24	19,66	17,91	19,67	5,39	17,03	16,69	14,78	16,72	13,60
4	13,14	11,75	20,54	20,51	14,91	17,91	11,66	17,94	8,03	17,99	11,66	16,32
5	6,19	14,60	16,44	19,22	18,48	10,05	12,63	14,02	17,35	21,96	24,05	14,55
<b>Valor Médio</b>	15,41	17,73	20,63	18,94	17,95	16,60	12,82	16,10	13,87	17,16	17,79	14,81
<b>Média dos Valores Médios</b>				18,18				15,86				15,91

Considerando agora o procedimento experimental de ligação adesiva, verificamos que o método mais eficiente para ligação dos provetes foi o tratamento 3, em que foi realizado um tratamento superficial de granalhagem. Este ensaio obteve a tensão de corte média mais elevada entre os três tratamentos de superfície, obtendo-se o valor médio de 8,33 MPa. A **Figura 32** apresenta um gráfico onde podemos verificar o conjunto de ensaios de soldadura e ligação adesiva. Comparando os melhores valores médios obtidos em cada procedimento, verificamos que o processo de soldadura apresenta uma tensão de corte máxima superior em 59,62%. Observando que o adesivo utilizado é recomendado especificamente para a ligação de materiais termoplásticos, é notória a potencialidade do método de soldadura face ao processo de ligação adesiva.

O processo de soldadura é realizado com um compósito cuja matriz é de polipropileno. Visto que é este material que está efetivamente a ser alterado por efeito da temperatura (uma vez que as fibras de vidro não sofrem alterações significativas às temperaturas de processamento do procedimento) é relevante comparar os resultados obtidos com a tensão de corte máxima possível do polipropileno. Sabendo que a tensão de rotura experimental do polipropileno é de **19 MPa**, admite-se uma tensão de corte máxima de 50% da tensão de rotura, ou 9,5 MPa. Comparando este valor com os valores médios obtidos no procedimento experimental, verifica-se que apenas o ensaio de **13 minutos a 550 K** (valor médio de **12,82 MPa**) se encontra abaixo do valor de tensão de corte do polipropileno. Isto leva a crer que, dado estarmos a tratar de um compósito com 55% de fração volúmica de fibras, existe um efeito de reforço na junta devido à adição de fibras. Este efeito de reforço é mais notório quando utilizamos os parâmetros de aquecimento mais eficazes, como é o caso do ensaio de **25 minutos a 510 K**, onde se verifica uma tensão de corte média superior em **65%**.

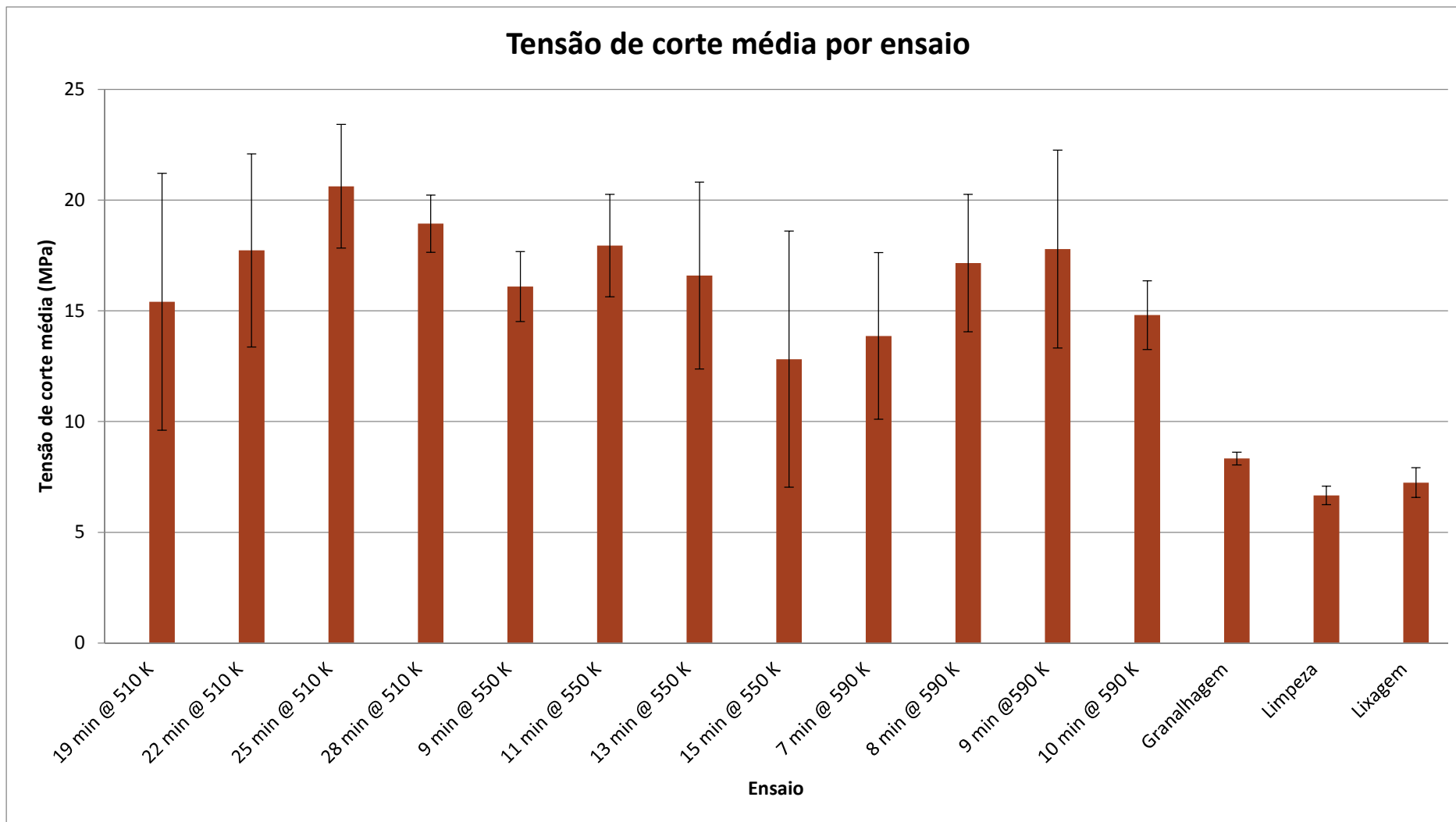


Figura 32 - Tensão de corte média por ensaio

### 5.3 Considerações Finais e Sugestões para trabalhos Futuros

O trabalho realizado nesta dissertação permitiu obter dados sobre o potencial das juntas de sobreposição simples na ligação de materiais compósitos de matriz termoplástica. Este tipo de materiais, normalmente ligado através de ligação mecânica ou adesiva (com adesivos específicos, devido ao polipropileno ser um polímero difícil de ligar), pode ser ligado com sucesso através de soldadura, o que aumenta o seu interesse para a utilização a nível industrial.

Relativamente ao procedimento experimental, o autor teve como dificuldades em garantir o correto dimensionamento da junta, como é possível verificar nos valores de sobreposição do **Anexo II**. De forma a melhorar esta questão, o autor desenvolveu para trabalhos futuros um molde que permite garantir a correta dimensão dos provetes, sendo que este permite também produzir cinco provetes em simultâneo. Com este molde pretende-se reduzir o desvio padrão dos ensaios, conseguindo assim resultados mais homogéneos. Os desenhos do molde para fabrico encontram-se no **Anexo III**.

Uma vez que este é um processo ainda na sua fase embrionária, existem ainda muitas variáveis que podem ser alteradas de forma a maximizar a capacidade do mesmo. Visto isto, o autor passa a enumerar algumas sugestões para investigações futuras:

- Procedimento experimental com temperaturas inferiores a 510 K;
- Procedimento experimental utilizando os tempos ótimos para processamento;
- Estudo do efeito da pressão no fabrico de juntas de sobreposição simples;
- Utilização de outros materiais termoplásticos como matriz para ligação;
- Estudar a influência da fração volúmica de fibras na ligação;
- Desenvolvimento de um processo de aquecimento localizado para produção de juntas.

Estes são apenas alguns dos pontos futuros a verificar de forma a conseguirmos expandir o nosso conhecimento neste procedimento, sendo também interessante conseguir tornar este processo acessível de utilizar em contexto industrial.



**BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES  
DE INFORMAÇÃO**



## 6 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

- [1] E. Witten, M. Thomas, and K. Michael, "Composites Market Report 2015," no. September, pp. 1–44, 2015.
- [2] R. N. Yancey, *Challenges, opportunities, and perspectives on lightweight composite structures*. Elsevier Ltd, 2016.
- [3] S. Poulidikidou, L. Jerpdal, A. Björklund, and M. Åkermo, "Environmental performance of self-reinforced composites in automotive applications — Case study on a heavy truck component," *Mater. Des.*, vol. 103, pp. 321–329, 2016.
- [4] J. R. Dufloy, J. De Moor, I. Verpoest, and W. Dewulf, "Environmental impact analysis of composite use in car manufacturing," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 58, no. 1, pp. 9–12, 2009.
- [5] C. Ageorges and L. Ye, *Fusion Bonding of Polymer Composites*. London: Springer London, 2002.
- [6] M. Niedernhuber, J. Holtmannspötter, and I. Ehrlich, "Fiber-oriented repair geometries for composite materials," *Compos. Part B Eng.*, vol. 94, pp. 327–337, 2016.
- [7] J. Fan and J. Njuguna, *An introduction to lightweight composite materials and their use in transport structures*. Elsevier Ltd, 2016.
- [8] D. Mathijssen, "Thermoplastic composites keep gaining momentum in the automotive industry," *Reinf. Plast.*, vol. 0, no. 0, pp. 1–5, 2016.
- [9] Eric Greene, *Marine Composites*. 1999.
- [10] P. Camanho and S. Hallett, *Composite joints and connections principles, modelling and testing*. 2011.
- [11] J. K. Jadee and A. R. Othman, "Fiber Reinforced Composite Structure with Bolted Joint - A Review," *Key Eng. Mater.*, vol. Volumes 47, pp. 939–944, 2011.
- [12] N. Chowdhury, W. K. Chiu, J. Wang, and P. Chang, "Static and fatigue testing thin riveted, bonded and hybrid carbon fiber double lap joints used in aircraft structures," *Compos. Struct.*, vol. 121, pp. 315–323, 2015.
- [13] S. Boria, A. Scattina, and G. Belingardi, "Experimental evaluation of a fully recyclable thermoplastic composite," *Compos. Struct.*, vol. 140, pp. 21–35, 2016.
- [14] H. Shi, I. F. Villegas, M.-A. Oceau, H. E. N. Bersee, and A. Yousefpour, "Continuous resistance welding of thermoplastic composites: Modelling of heat generation and heat transfer," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 70, pp. 16–26, 2015.

- [15] P. J. Novo, J. F. Silva, J. P. Nunes, and A. T. Marques, "Pultrusion of fibre reinforced thermoplastic pre-impregnated materials," *Compos. Part B Eng.*, vol. 89, pp. 328–339, 2016.
- [16] A. A. Mendes, A. M. Cunha, and C. A. Bernardo, "Study of the degradation mechanisms of polyethylene during reprocessing," *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 96, no. 6, pp. 1125–1133, 2011.
- [17] M. Ageorges, C.; Ye, L.; Hou, "Advances in fusion bonding techniques for joining thermoplastic matrix composites: a review," *Compos. Part A-Applied Sci. Manuf.*, vol. 32, pp. 839–857, 2000.
- [18] W. Knapp, S. Clement, C. Franz, M. Oumarou, and J. Renard, "Laser-bonding of long fiber thermoplastic composites for structural assemblies," *Phys. Procedia*, vol. 5, no. PART 2, pp. 163–171, 2010.
- [19] W. Suwanwatana, S. Yarlagadda, and J. W. Gillespie, "Hysteresis heating based induction bonding of thermoplastic composites," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 66, no. 11–12, pp. 1713–1723, 2006.
- [20] M. Ageorges, C.; Ye, L.; Hou, "Experimental Investigation of the resistance welding for thermoplastic-matrix composites. Part II: optimum processing window and mechanical performance," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 60, pp. 1191–1202, 2000.
- [21] A. B. Strong, *Fundamentals of Composite Manufacturing; materials, methods, and applications*, 2nd ed., vol. 3, no. 1. 1992.
- [22] F. C. Campbell, *Structural Composite Materials. ASM International*. 2010.
- [23] P. K. Mallick, *Fiber Reinforced Composites - Materials, Manufacturing, and Design*. 2007.
- [24] S. Miracle and D. Donaldson, *ASM Handbook Volume 21 - Composites*. 2001.
- [25] S. Mazumdar, *Composites Manufacturing : Materials, Product and Process Engineering*. 2002.
- [26] F. Mathews and R. Rawlings, *Composite Materials: Engineering and Science*. CRC Press, 2008.
- [27] R. Gibson, *Principles of Composite Material Mechanics*, 3rd ed. 2012.
- [28] R. Crawford, *Plastics Engineering*, 3rd ed. Elsevier, 2008.
- [29] M. Kutz, *Mechanical Engineers' Handbook: Materials and Mechanical Design, Vol. 1*, 3rd ed. 2006.
- [30] M. Marcelo F. S. de, A. B. de Morais, and A. G. de Magalhães, *Materiais Compositos - Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico*, 2ª edição. Publindustria, Edições

- Técnicas, 2011.
- [31] G. Pritchard, *DEVELOPMENTS IN REINFORCED PLASTICS*. 1986.
- [32] A. Yousefpour, M. Hojjati, and J.-P. Immarigeon, "Fusion Bonding/Welding of Thermoplastic Composites," *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, vol. 17, no. 4, pp. 303–341, 2004.
- [33] P. P. Camanho and F. L. Matthews, "Delamination Onset Prediction in Mechanically Fastened Joints in Composite Laminates," *J. Compos. Mater.*, vol. 33, no. 10, pp. 906–927, 1999.
- [34] C. T. McCarthy and M. A. McCarthy, *Design and failure analysis of composite bolted joints for aerospace composites*. Elsevier Ltd, 2014.
- [35] C. T. McCarthy, M. A. McCarthy, and V. P. Lawlor, "Progressive damage analysis of multi-bolt composite joints with variable bolt-hole clearances," *Compos. Part B Eng.*, vol. 36, no. 4, pp. 290–305, 2005.
- [36] B. L. Agarwal, "Static Strength Prediction of Bolted Joint in Composite Material," *AIAA J.*, vol. 18, no. 11, pp. 1371–1375, 1980.
- [37] H. J. Park, "Effects of stacking sequence and clamping force on the bearing strengths of mechanically fastened joints in composite laminates," *Compos. Struct.*, vol. 53, no. 2, pp. 213–221, 2001.
- [38] K. I. Tserpes, G. Labeas, P. Papanikos, and T. Kermanidis, "Strength prediction of bolted joints in graphite/epoxy composite laminates," *Compos. Part B Eng.*, vol. 33, no. 7, pp. 521–529, 2002.
- [39] T. S. Lim, B. C. Kim, and D. G. Lee, "Fatigue characteristics of the bolted joints for unidirectional composite laminates," *Compos. Struct.*, vol. 72, no. 1, pp. 58–68, 2006.
- [40] a. Valenza, V. Fiore, C. Borsellino, L. Calabrese, and G. Di Bella, "Failure Map of Composite Laminate Mechanical Joint," *J. Compos. Mater.*, vol. 41, no. 8, pp. 951–964, 2007.
- [41] K. S. Weidner, J. W. Gillespie, and N. Shevchenko, "Performance of bolted joints in discontinuous ceramic cored sandwich structures - static experimental testing," *Compos. Struct.*, vol. 93, no. 12, pp. 3175–3184, 2011.
- [42] L. M. P. Durão, D. J. S. Gonçalves, J. M. R. S. Tavares, V. H. C. de Albuquerque, A. Aguiar Vieira, and A. Torres Marques, "Drilling tool geometry evaluation for reinforced composite laminates," *Compos. Struct.*, vol. 92, no. 7, pp. 1545–1550, 2010.

- [43] C. C. Tsao, H. Hocheng, and Y. C. Chen, "Delamination reduction in drilling composite materials by active backup force," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 61, no. 1, pp. 91–94, 2012.
- [44] F. Gamdani, R. Boukhili, and A. Vadean, "Tensile strength of open-hole, pin-loaded and multi-bolted single-lap joints in woven composite plates," *Mater. Des.*, vol. 88, pp. 702–712, 2015.
- [45] A. Pizzi and K. L. Mittal, *Handbook of Adhesive Technology*. 2003.
- [46] E. M. Petrie, "Handbook of Adhesives and Sealants," 2000.
- [47] S. Ebnesajjad, *Adhesives Technology Handbook*, 2 nd. William Andrew Inc., 2008.
- [48] A. Higgins, "Adhesive bonding of aircraft structures," *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 20, no. 5, pp. 367–376, 2000.
- [49] L. F. M. Silva, A. G. Magalhães, and M. Marcelo F. S. de, *Juntas Adesivas Estruturais*. Publindustria, 2007.
- [50] R. A. Veselovsky and V. N. Kestelman, *Adhesion of Polymers*. 2002.
- [51] C. V. Katsiropoulos, A. N. Chamos, K. I. Tserpes, and S. G. Pantelakis, "Fracture toughness and shear behavior of composite bonded joints based on a novel aerospace adhesive," *Compos. Part B Eng.*, vol. 43, no. 2, pp. 240–248, 2012.
- [52] O. Volkersen, "Die nietkraftoerteilung in zubeanspruchten nietverbindungen konstanten loschonquerschnitten," *Luftfahrtforschung*, vol. 15, pp. 41–47, 1938.
- [53] J. A. B. P. Neto, R. D. S. G. Campilho, and L. F. M. Da Silva, "Parametric study of adhesive joints with composites," *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 37, pp. 96–101, 2012.
- [54] M. F. S. F. De Moura, R. Daniaud, and A. G. Magalhães, "Simulation of mechanical behaviour of composite bonded joints containing strip defects," *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 26, no. 6, pp. 464–473, 2006.
- [55] F. M. F. Ribeiro, R. D. S. G. Campilho, R. J. C. Carbas, and L. F. M. da Silva, "Strength and damage growth in composite bonded joints with defects," *Compos. Part B Eng.*, vol. 100, pp. 91–100, 2016.
- [56] M. Gehde, M. Giese, and G. W. Ehrenstein, "Welding of thermoplastics reinforced with random glass mat," *Polym. Eng. Sci.*, vol. 37, no. 4, pp. 702–714, 1997.
- [57] J. Gonçalves, J. F. Dos Santos, L. B. Canto, and S. T. Amancio-Filho, "Friction spot welding of carbon fiber-reinforced polyamide 66 laminate," *Mater. Lett.*, vol. 159, pp. 506–509, 2015.
- [58] I. F. Villegas, "Strength development versus process data in ultrasonic welding of thermoplastic composites with flat energy directors and its application to the

- definition of optimum processing parameters,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 65, pp. 27–37, 2014.
- [59] D. B. Spalding, *Handbook of heat transfer*, vol. 18, no. 10. 1975.
- [60] T. L. Bergman, A. S. Lavine, F. P. Incropera, and P. Dewitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 7th editio., vol. 86, no. 3. 2011.
- [61] P. J. Novo, J. F. Silva, J. P. Nunes, and A. T. Marques, “Advances in Thermoplastic Pultruded Composites,” no. July, pp. 19–24, 2015.
- [62] ASTM D 1002, “Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading ( Metal-to-Metal),” *Standards*, vol. 1, pp. 1–5, 2005.
- [63] K. S. Y. S. C. Sato, “Effect of surface treatment on the critical energy release rates of welded joints between glass fiber reinforced PP and metals,” *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 67, pp. 31–37, 2016.
- [64] M. Hou and K. Friedrich, “Resistance welding of continuous glass fibre-reinforced polypropylene composites,” *Compos. Manuf.*, vol. 3, no. 3, pp. 153–163, 1992.
- [65] G. Jandali and P. K. Mallick, “Vibration welding of a unidirectional continuous glass fiber reinforced polypropylene GMT,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 36, no. 12, pp. 1687–1693, 2005.



# ANEXOS

ANEXO I

ANEXO II

ANEXO III

ANEXO I -



# Scotch-Weld™

## Structural Plastic Adhesive

DP-8005 Translucent • DP-8005 Black

Technical Data

January, 2003

### Product Description

3M™ Scotch-Weld™ Structural Plastic Adhesive DP-8005 is a two-part acrylic-based adhesive (10:1 ratio by volume) that can bond many low surface energy plastics, including many grades of polypropylene, polyethylene, and TPO's without special surface preparation.

Scotch-Weld DP-8005 can replace screws, rivets, plastic welding, and two-step processes which include chemical etchants, priming or surface treatments in many applications.

### Features

- Ability to Bond Dissimilar Substrates
- Ability to Structurally Bond Polyolefins
- Room Temperature Cure
- Excellent Water and Humidity Resistance
- Very Good Chemical Resistance
- One Step Process - No Pre-Treatment of the Substrates Needed
- Solvent-free Adhesive System
- Convenient Hand-Held Applicator System
- Available in Bulk

### Typical Uncured Physical Properties

**Note: The following technical information and data should be considered representative or typical only and should not be used for specification purposes.**

Product		Translucent	Black
<b>Color</b>	Base (B) Accelerator (A)	Amber White	Black White
<b>Lbs./gal.</b>	Base (B) Accelerator (A)	8-8.4 8.75-9.15	8-8.4 8.75-9.15
<b>Viscosity (cPs.)<sup>(1)</sup></b>	Base (B) Accelerator (A)	17,000-30,000 35,000-55,000	15,000-30,000 35,000-55,000
<b>Base Resin</b>	Base (B) Accelerator (A)	Methacrylate Amine	Methacrylate Amine
<b>Mix Ratio (B:A)</b>	By Volume By Weight	10:1 9.16:1	10:1 9.16:1
<b>Full Cure Time @ 73°F (23°C)</b>		8-24 hrs.	
<b>Time to Handling Strength (50 psi @ 73°F [23°C])</b>		2-3 hrs.	
<b>Work Life at 73°F (23°C)</b>		2.5-3 min.	

(1) Viscosity obtained by Brookfield, DV-II, #7 Spindle, 20 rpm at 75°F (24°C).

The accelerator formula is common to both DP-8005 Natural and DP-8005 Black

# Scotch-Weld™

## Structural Plastic Adhesive

DP-8005 Translucent • DP-8005 Black

### Typical Cured Physical Properties

**Note: The following technical information and data should be considered representative or typical only and should not be used for specification purposes.**

#### 3M™ Scotch-Weld™ Structural Plastic Adhesive DP-8005

	Translucent	Black
Color	Yellow	Black
Shore D Hardness (ASTM D-2240)	55	60
Tg onset (°C) <sup>(2)</sup>	33	
Coefficient of Thermal Expansion (ppm/°C) <sup>(2)</sup>	Below Tg	125
	Above Tg	170
Mechanical Properties <sup>(3)</sup>		
Strain at Peak Load	5.3%	4.5%
Stress at Peak Load (psi)	1889	1692
Modulus at 1% Strain (psi)	85,669	58,782

(2) Tg and CTE determined by TMA -40°F to 249°F (-40°C to 120°C) at 10°F (5°C)/min. (after 2 heat cycles).

(3) Mechanical properties obtained using a Sintech 5GL Mechanical Tester. Approximate dimensions of the test specimen was 1.5" x 0.5" x 0.3". Elongation was determined by crosshead displacement. The crosshead velocity was 0.5"/min.

### Typical Adhesive Performance Characteristics

**Note: The following technical information and data should be considered representative or typical only and should not be used for specification purposes.**

#### Overlap Shear (OLS) Strength in psi<sup>(4)</sup>

Substrate	Temp	Translucent	Black
HDPE	75°F (24°C)	1000 SY	998 SY
PP	75°F (24°C)	1040 SF	1066 SY
UHMW PE	75°F (24°C)	770 SY	757 SY
LDPE	75°F (24°C)	330 SY	350 SY
ABS	75°F (24°C)	970 SF	1575 SF
Polycarbonate	75°F (24°C)	850 SF	1102 AF
PMMA	75°F (24°C)	810 SF	1093 SF
Rigid PVC	75°F (24°C)	1540 SF	1770 SF
HIPS	75°F (24°C)	550 SY	483 SY
G-FRP	75°F (24°C)	2370 CF	2514 CF
HDPE/HDG	75°F (24°C)	985 SY (HDPE)	865 MM
HDPE/Galvanealed	75°F (24°C)	970 SY (HDPE)	1043 SY (HDPE)
HDPE/CRS	75°F (24°C)	970 SY (HDPE)	1028 MM
Oily HDG	75°F (24°C)	2150 CF	1223 MM

SY = Substrate Yield  
 SF = Substrate Failure/Break  
 CF = Cohesive Failure  
 MM = Mixed

(4) Overlap Shear Test Method: overlap shear test for adhesion determined in accordance to ASTM D1002, sample dimensions were 1" x 4" x 1/8", with a 1/2 square inch of area of overlap, bonded to themselves unless otherwise noted, allowed to cure for at least 16 hours at 75°F (24°C) before testing. Data were collected using a Sintech 5GL Mechanical Tester with a 2000# or 5000# load cell. Test rate was 0.5"/minute. Strength determined at 73°F (23°C) unless otherwise noted.

# Scotch-Weld™

## Structural Plastic Adhesive

DP-8005 Translucent • DP-8005 Black

**Typical Adhesive Performance Characteristics**  
(continued)

**Note:** The following technical information and data should be considered representative or typical only and should not be used for specification purposes.

### T-Peel Bond Strength in pli<sup>(5)</sup> 3M™ Scotch-Weld™ Structural Plastic Adhesive DP-8005

Substrate	Temp	Translucent	Black
HDPE	75°F (24°C)	10 C sh	9 C sh

C sh - Cohesive but shocky

(5) Peel tests on 0.02" HDPE, 0.017" bondline thickness, 8" x 1" in T-peel mode at a rate of 2.0"/min.

### OLS Bond Strengths (psi) on HDPE After Environmental and Chemical Exposure Test<sup>(6)</sup>

Condition	Time	Temp	Translucent	Black
Control	14 days	75°F (24°C)	980 SY	1001 SY
160°F/100% RH	14 days	160°F (71°C)	810 SY	918 CF
160°F Water Soak	14 days	160°F (71°C)	978 CF	1007 CF/SY
10% NaOH	14 days	75°F (24°C)	960 SY	1028 SY
16% HCl	14 days	75°F (24°C)	970 SY	1016 SY
20% Bleach	14 days	75°F (24°C)	980 SY	1018 SY
IPA	14 days	75°F (24°C)	940 SY	994 CF/SY
Antifreeze	14 days	75°F (24°C)	960 SY	1024 SY
Gasoline	14 days	75°F (24°C)	150 CF	320 CF
Diesel Fuel	14 days	75°F (24°C)	840 CF	878 SY
Toluene	14 days	75°F (24°C)	14 CF	23 CF

SY = Substrate Yield  
CF = Cohesive Failure  
CF/SY = Substrate elongated before bond failed cohesively.

(6) Environmental tests were conducted by immersing bonded coupons of HDPE and subsequent testing in accordance with footnote 4.

### OLS Bond Strengths at Elevated Temperatures<sup>(7)</sup>

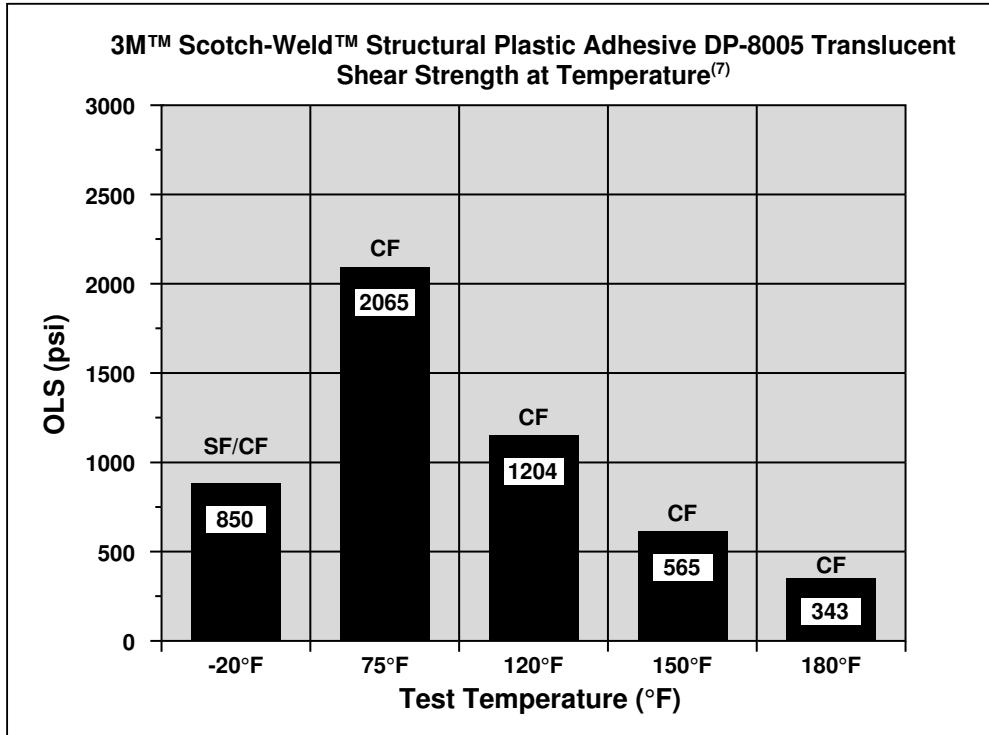
Test Temperature	Translucent HDPE	Black HDPE	Translucent G-FRP	Black G-FRP
-20°F (-29°C)	624 ± 45 CF	765 ± 68 CF	849 ± 64 MM	756 ± 88 AF
73°F (23°C)	932 ± 12 SY	966 ± 19 SY	2065 ± 153 CF	2468 ± 60 CF
120°F (49°C)	594 ± 8 CF	555 ± 25 CF	1204 ± 153 CF	1104 ± 104 CF
150°F (66°C)	378 ± 12 CF	358 ± 15 CF	565 ± 44 CF	617 ± 84 CF
180°F (82°C)	236 ± 15	235 ± 14 CF	343 ± 56 CF	439 ± 40 CF

OLS bond strength expressed in psi.  
SY = Substrate Yield  
CF = Cohesive Failure  
MM = Mixed Mode  
AF = Adhesive Failure

(7) Temperature resistance tests were conducted at specified temperature in accordance with footnote 4.

**Scotch-Weld™**  
**Structural Plastic Adhesive**  
 DP-8005 Translucent • DP-8005 Black

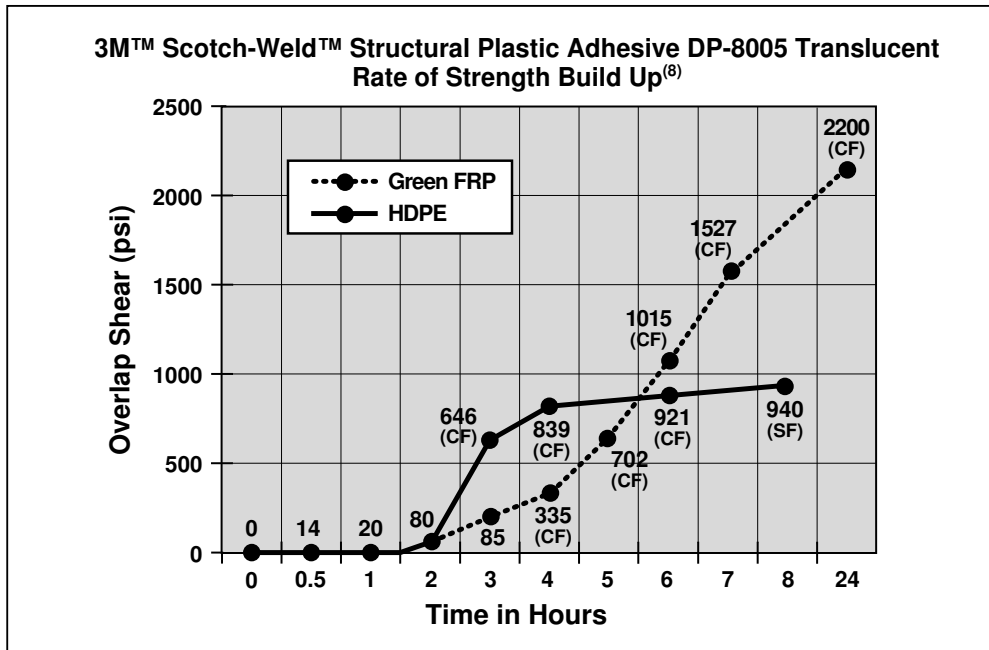
**Figure 1**  
 BSI 118505-9



SF = Substrate Failure  
 CF = Cohesive Failure

(7) Temperature resistance tests were conducted at specified temperature in accordance with footnote 4.

**Figure 2**  
 BSI 118505-52



(8) Rate of strength testing done using overlap shear test described in footnote 4.

# Scotch-Weld™

## Structural Plastic Adhesive

DP-8005 Translucent • DP-8005 Black

### Suggested Substrates

**Note:** The following suggestions are based on laboratory tests on typical grades of the listed substrates. Because of the many combinations of process aids and additives that are used with plastic substrates, the user is responsible for determining whether 3M™ Scotch-Weld™ Structural Plastic Adhesive DP-8005 is appropriate for a given application.

<b>Potential Primary Surfaces</b>	Polypropylene (PP) Polyethylene (PE) (HDPE) (LDPE)
<b>Potential Secondary Surfaces</b>	Fiber Reinforced Plastic (FRP)      Rigid PVC Polycarbonate (PC)                      ABS Wood    Acrylic (PMMA) Aluminum                                        Polystyrene Glass    Concrete Thermoplastic Elastomers (TPE)
<b>Not Recommended Surfaces</b> Inconsistent results have been exhibited with substrates that contain oils and anti-stats.	PTFE (Teflon®) Silicone Surfaces Mold-release Agents Polyimide Nylons

### Handling/Curing Information

#### Directions for Use:

**Important:** Use only the specified 3M™ EPX™ Plus Applicator system or appropriate meter mix equipment to ensure the proper 10:1 mix ratio and mix. Hand mixing is not recommended, and may result in unpredictable results.

- 1) Apply adhesive to clean, dry substrates, which are free of loose paint, oxide films, oils, dust, mold release agents and all other surface contaminants. See the Surface Preparation section for specific substrate preparation methods:

**35 ml cartridge:**

Place duo-pak cartridge in EPX applicator. Remove cap. Remove rubber plug. Dispense and discard a small amount of adhesive to assure even ratio and free flow. Clear orifice if necessary. Use only orange 10:1 mixing nozzle by: 1) aligning nozzle notch with cartridge recess, and 2) twisting into place. Dispense and discard a small amount of adhesive through nozzle until the adhesive is mixed.

**250 ml cartridge:**

While holding duo-pak cartridge in an upright position, remove and discard the insert from the cartridge by unscrewing plastic nut and removing metal washer. Place cartridge in a 10:1, 250 ml EPX applicator.

Clean orifice if clogged; dispense and discard a small amount of adhesive to even pistons. Attach orange 10:1 EPX mixing nozzle by:

- A) sliding the nozzle over the cartridge orifice until the nozzle notch **aligns** and **seats** against the tab on the neck of the cartridge and;
- B) screwing the plastic nut back onto the cartridge to secure the nozzle. Dispense and discard a small amount of adhesive until the adhesive has a milky white appearance. If adhesive is clear, check the small orifice for debris.

**Meter-Mix Equipment**

Follow manufacturer’s precautions, directions for use, and recommendations.

**Scotch-Weld™**  
**Structural Plastic Adhesive**  
 DP-8005 Translucent • DP-8005 Black

**Handling/Curing Information (continued)**

- 2) After the adhesive is applied, substrates must be mated within the worklife of the adhesive, 2-2.5 minutes for one-sided applications. Adhesive thickness less than .005" will yield unpredictable results. The joint design of the substrates should facilitate a .005" to .008" adhesive thickness at the bondline. Adhesive contains .008" microspheres for this purpose.
- 3) The bonded surfaces should be fixtured, or clamped, for at least 2 hours. The clamping pressure should be sufficient to keep the surfaces in contact during cure (typically 4-8 psi). Plastic parts can be designed to be self-fixturing, negating the need for external fixturing.  
**Note:** Heating the bondline to 150-175°F (66-80°C) for 30 minutes will speed curing. (The parts should be dwelled for a minimum of 10 minutes at room temperature prior to heating.)
- 4) Cured adhesive appearance: the adhesive will yellow with time; a rippling effect in the adhesive as it cures is normal and indicates that the adhesive is mixed properly and curing normally.

**Approximate Coverage – By Size of Container [Figures do not include nozzle waste]**

Bead Size	Linear ft per 35 ml	Linear ft per 250 ml	Linear ft per mixed gallon
1/2"	1.8	12.9	196
3/8"	3	23	350
1/4"	7	51.8	785
1/8"	28.9	206.7	3,130
1/16"	114.8	820	12,240

**Coverage in square feet – (.008" bond line) [Figures do not include nozzle waste]**

Square ft per 35 ml	Square ft per 250 ml	Square ft per mixed gallon
2	13	200

# Scotch-Weld™

## Structural Plastic Adhesive

DP-8005 Translucent • DP-8005 Black

---

### Surface Preparation

3M™ Scotch-Weld™ Structural Plastic Adhesive DP-8005 can bond polypropylene, polyethylene and other thermoplastic polyolefins without special surface preparation. However, all substrates should be clean, dry and free of paint, oxide films, oils, dust, mold release agents and other surface contaminants. The amount of surface preparation directly depends on the bond strength and environmental resistance desired by the user.

The following cleaning methods are suggested for common surfaces.

#### Steel and Aluminum

- 1) Wipe free of dust with oil-free solvent such as acetone or isopropyl alcohol.
- 2) Sandblast or abrade using clean fine grit abrasives (180 grit or finer).
- 3) Wipe again with solvent to remove loose particles.
- 4) If a primer is used, it should be applied within 4 hours after surface preparation. If 3M™ Scotch-Weld™ Structural Adhesive Primer 1945 B/A is used, apply a thin coating (.0005") on the metal surfaces to be bonded, air dry at 75°F (24°C) for 1 hr, then cure for 30 minutes at 180°F (82°C), 5 minutes at 250°F (122°C) or 3 hours at 75°F (24°C).

**Note:** Aluminum may also be acid etched. Follow the manufacturer's precautions and directions for this procedure.

#### Plastic/Rubber

- 1) Wipe with isopropyl alcohol.\*
- 2) Abrade using fine grit abrasives (180 grit or finer).
- 3) Remove residue by wiping again with isopropyl alcohol.\*

#### Glass

- 1) Solvent wipe surface using acetone.\*

**\*Note:** When using solvents, be sure to extinguish all ignition sources and follow the manufacturer's precautions and directions for use.



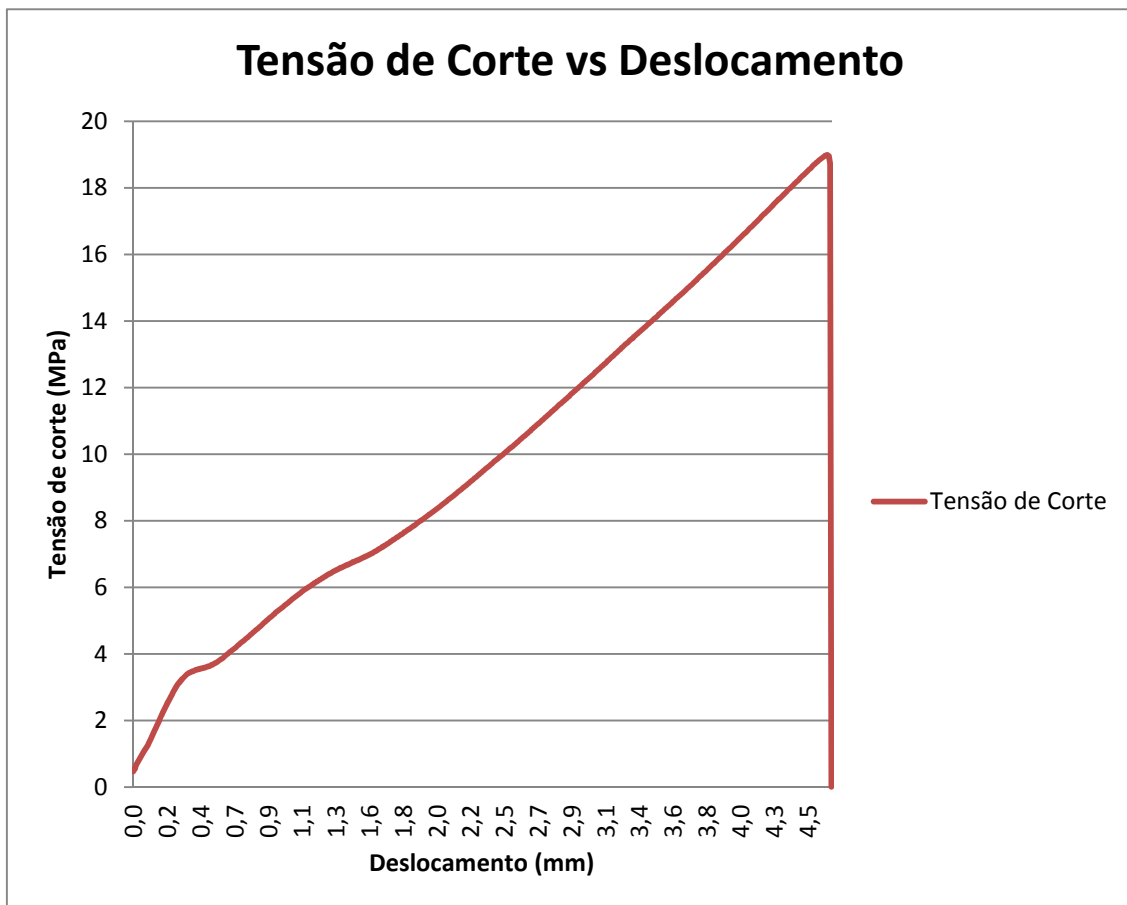
ANEXO II -

# Ensaio a 510 K

19 min @ 510 K

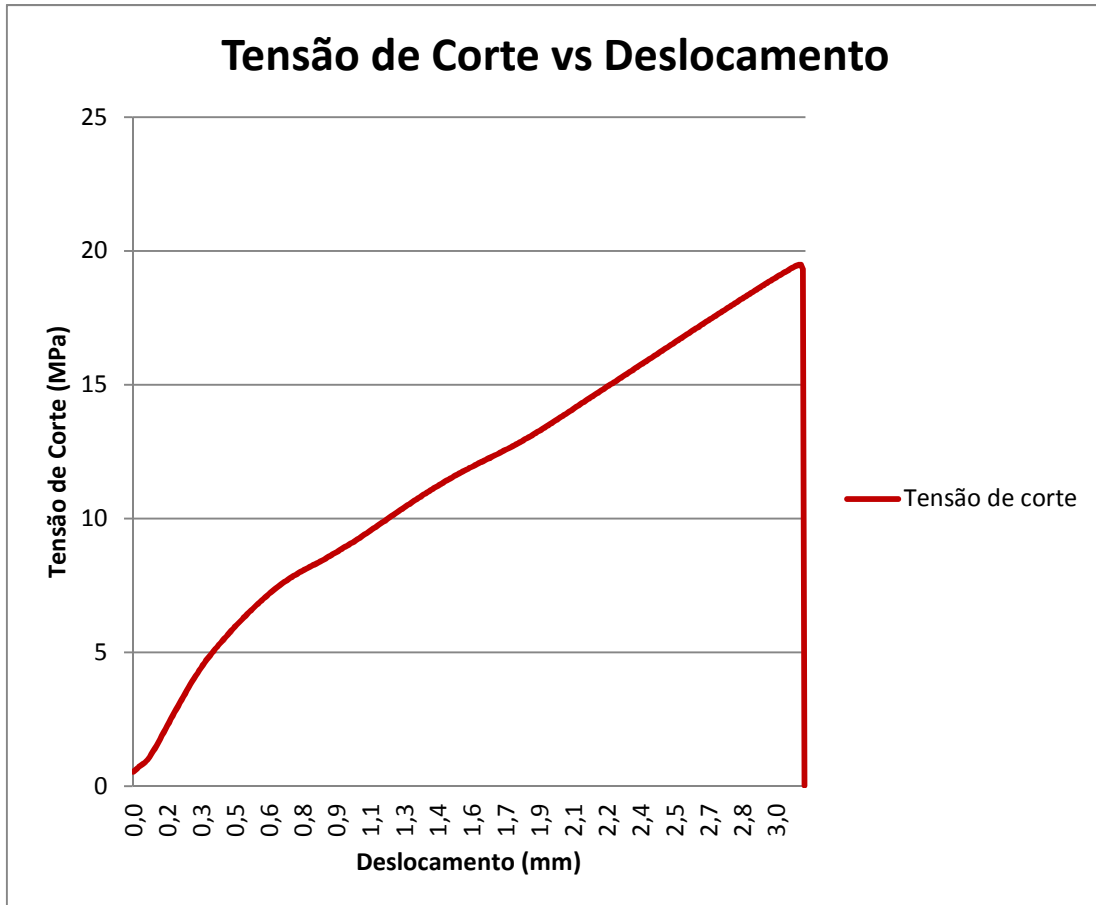
Provete 1:

Dados do provete	
Comprimento de sobreposição	16,2
Largura de sobreposição	20,9
Força máxima Aplicada	6824,46
Tensão de corte Máxima	18,98



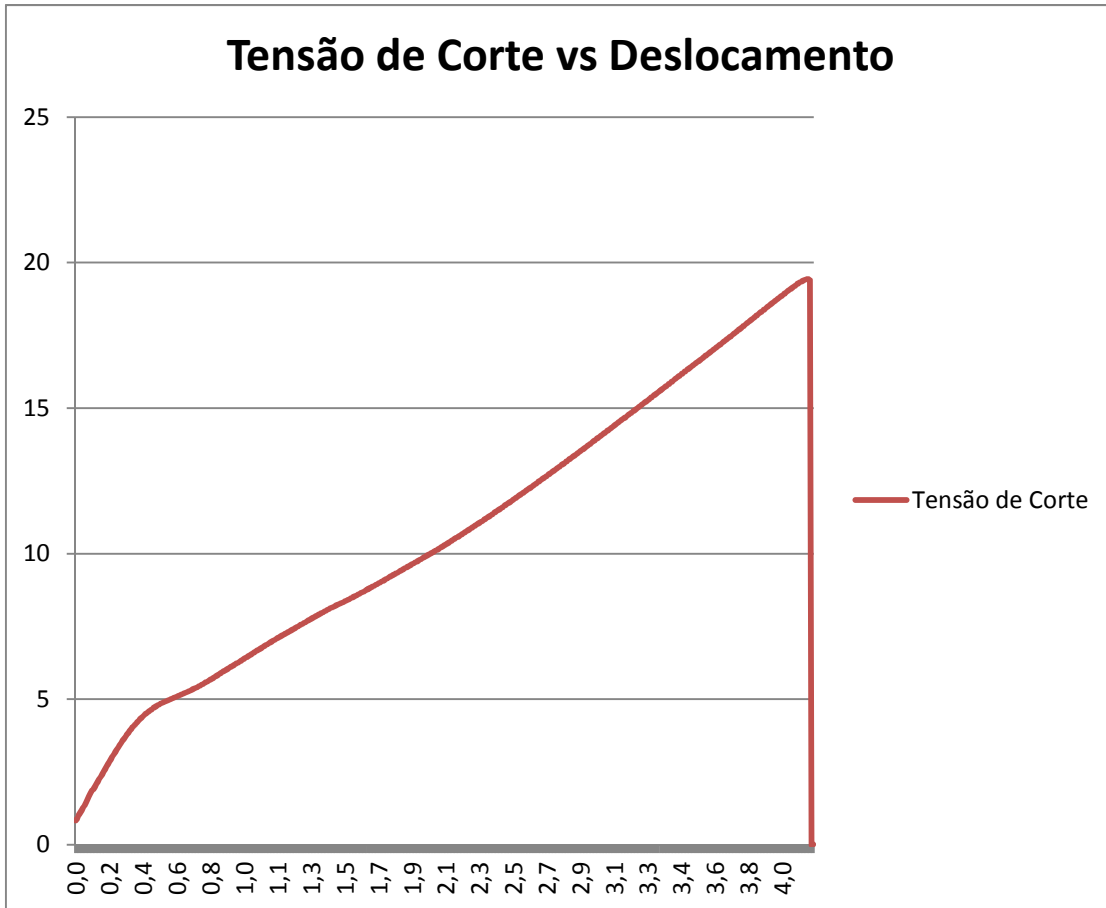
Provete 2:

Dados do provete	
Comprimento de sobreposição (mm)	14,6
Largura de sobreposição (mm)	20,6
Força máxima Aplicada (N)	5860,62
Tensão de corte Máxima (MPa)	19,49



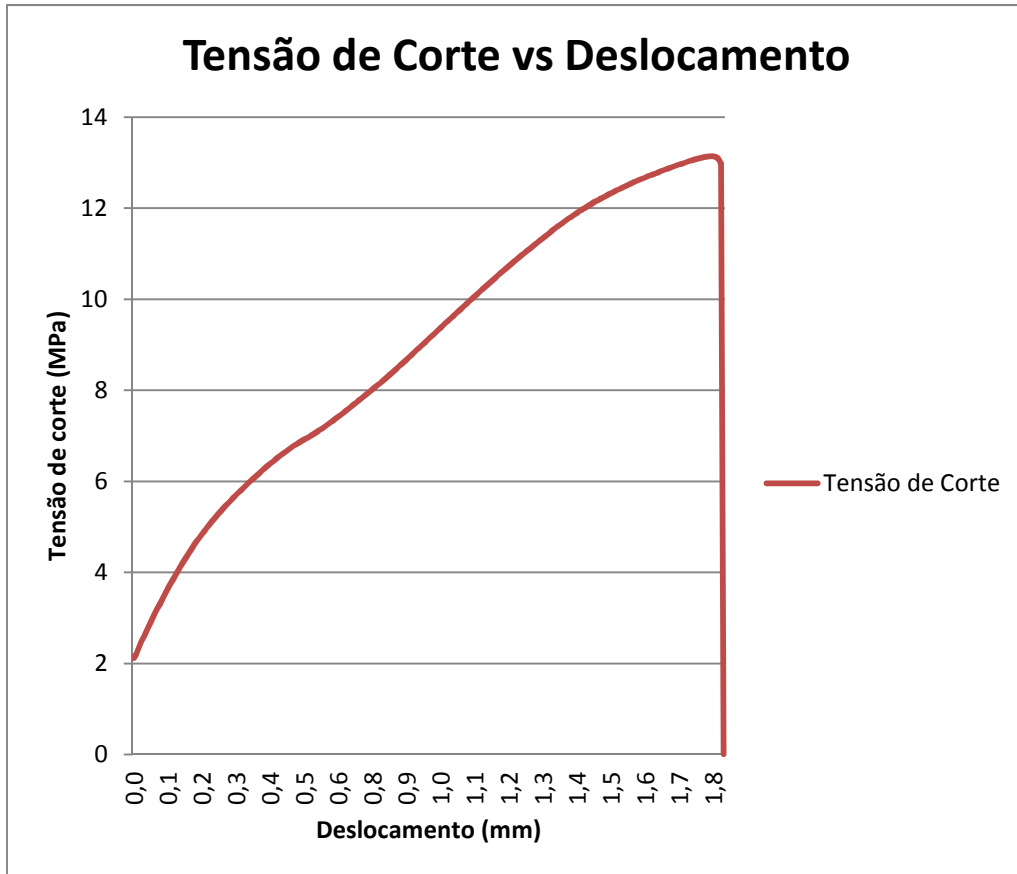
**Provete 3:**

<b>Dados do provete</b>	
<b>Comprimento de sobreposição (mm)</b>	15,5
<b>Largura de sobreposição (mm)</b>	20,6
<b>Força máxima Aplicada (N)</b>	6205,32
<b>Tensão de corte Máxima (MPa)</b>	19,43



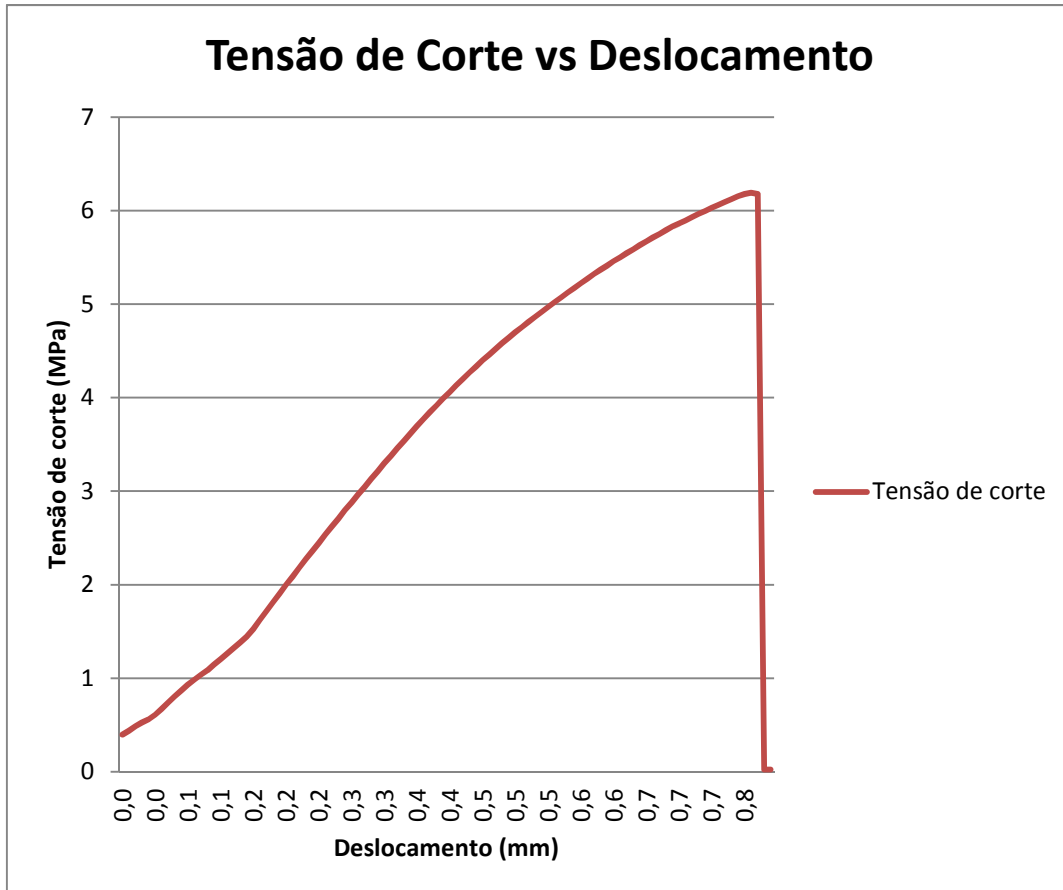
Provete 4:

Dados do provete	
Comprimento de sobreposição (mm)	16,1
Largura de sobreposição (mm)	20,1
Força máxima Aplicada (N)	4251,96
Tensão de corte Máxima (MPa)	13,14



Provete 5:

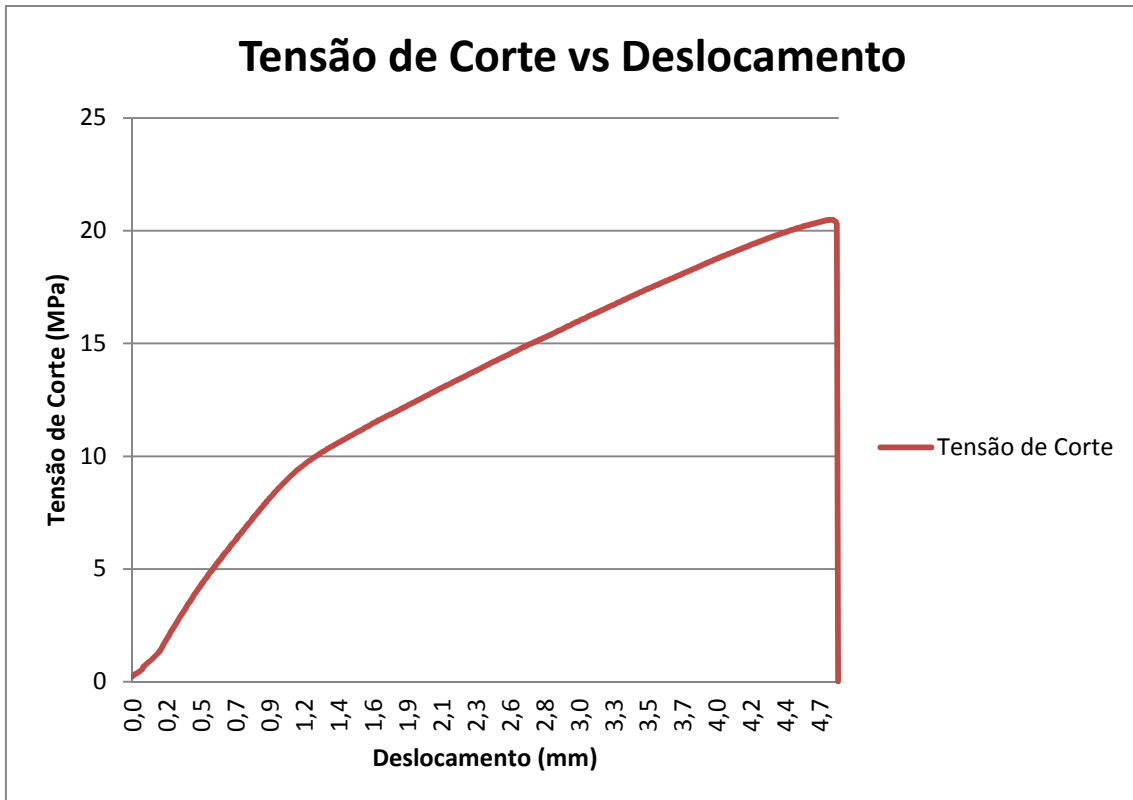
Dados do provete	
Comprimento de sobreposição (mm)	17,7
Largura de sobreposição (mm)	19,8
Força máxima Aplicada (N)	2169,64
Tensão de corte Máxima (MPa)	6,19



**22 min @ 510K**

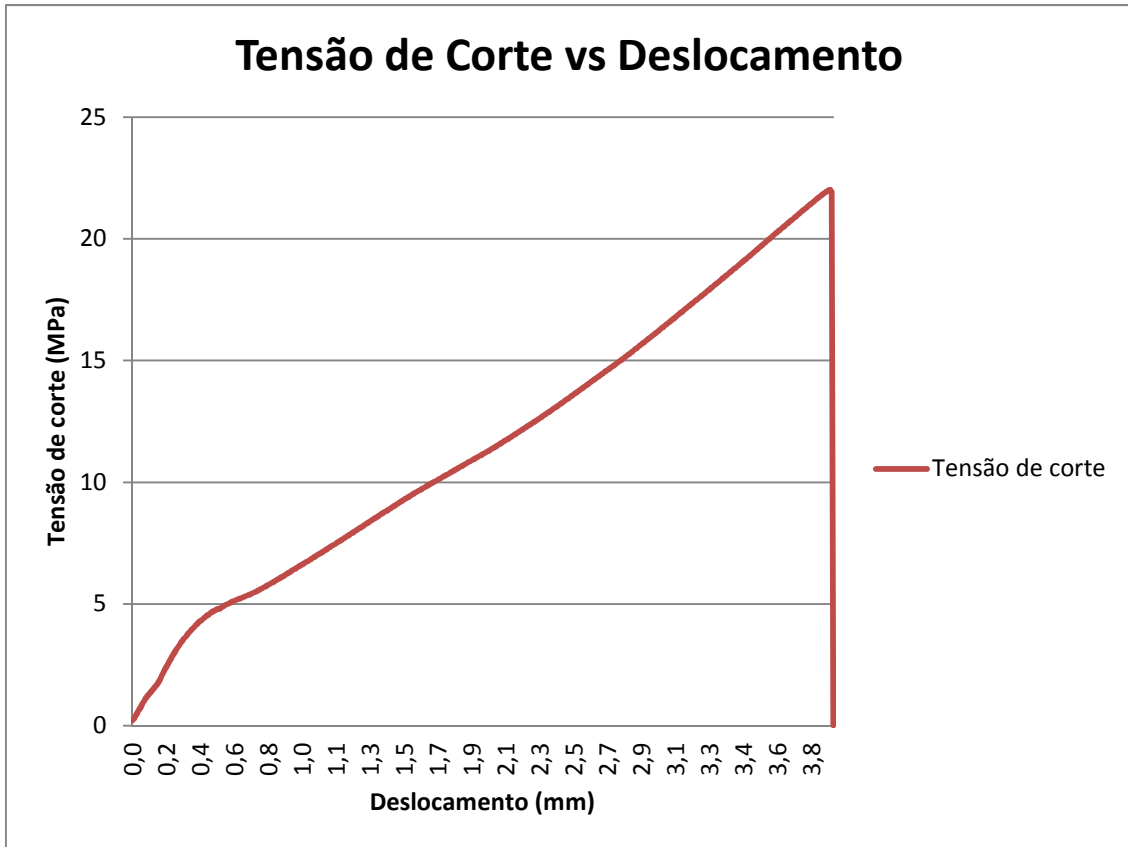
**Provete 1:**

<b>Dados do provete</b>	
<b>Comprimento de sobreposição (mm)</b>	17,2
<b>Largura de sobreposição (mm)</b>	20,2
<b>Força máxima Aplicada (N)</b>	7116,54
<b>Tensão de corte Máxima (MPa)</b>	20,48



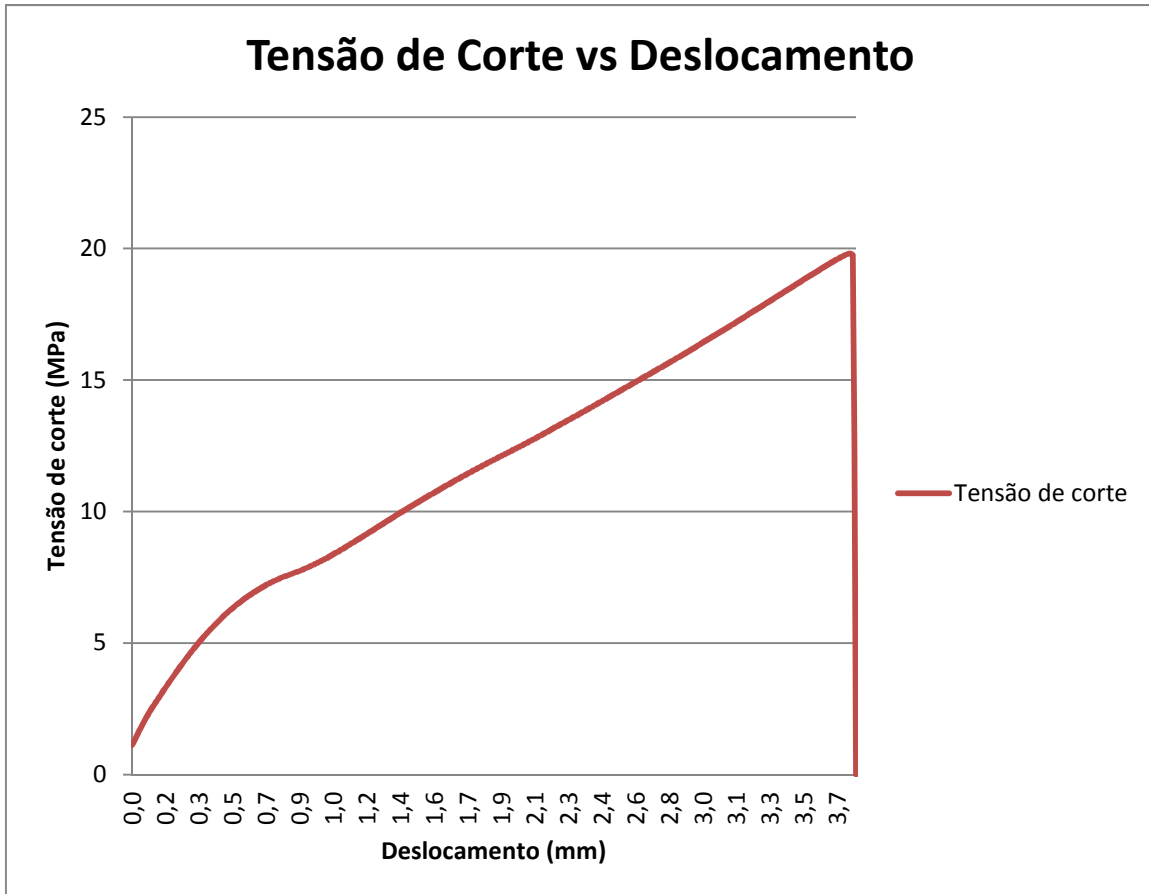
Provete 2:

Dados do provete	
Comprimento de sobreposição (mm)	13,1
Largura de sobreposição (mm)	20,7
Força máxima Aplicada (N)	5964,95
Tensão de corte Máxima (MPa)	21,99



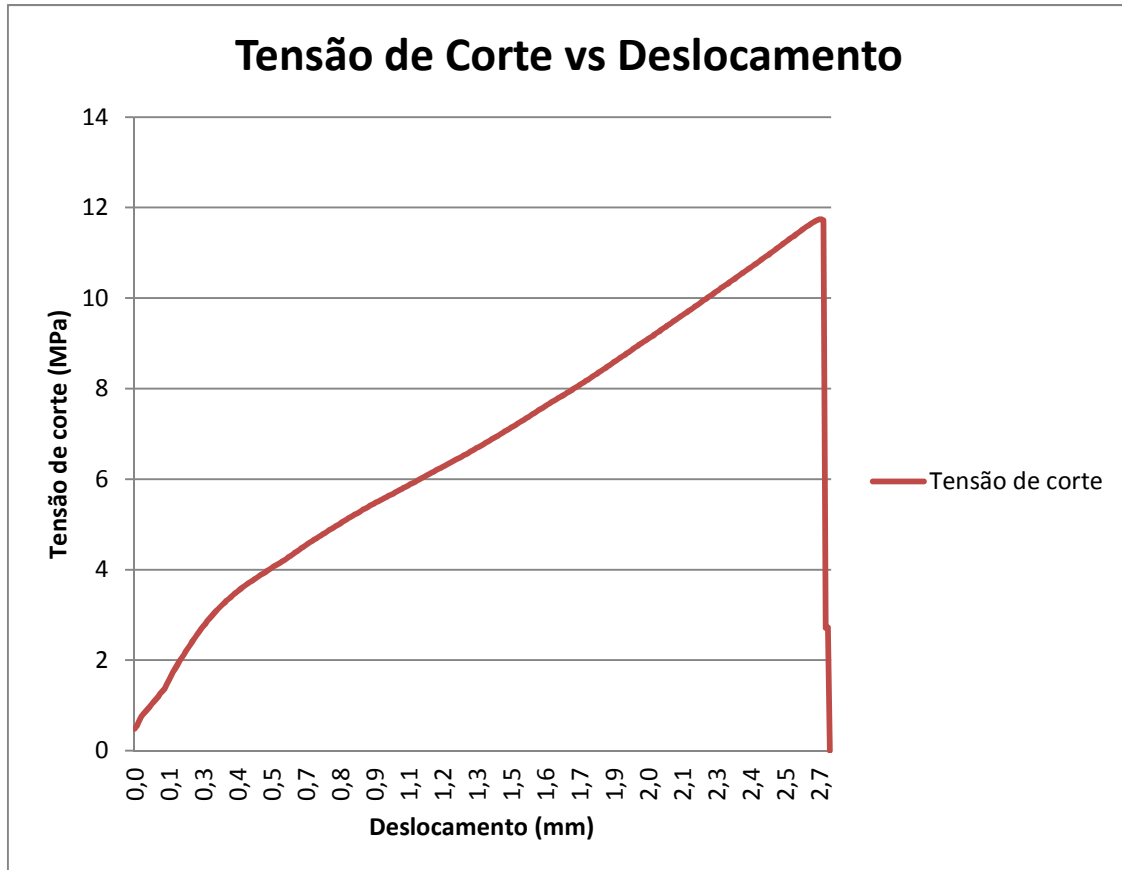
**Provete 3:**

<b>Dados do provete</b>	
<b>Comprimento de sobreposição (mm)</b>	16,1
<b>Largura de sobreposição (mm)</b>	20,1
<b>Força máxima Aplicada (N)</b>	6409,90
<b>Tensão de corte Máxima (MPa)</b>	19,81



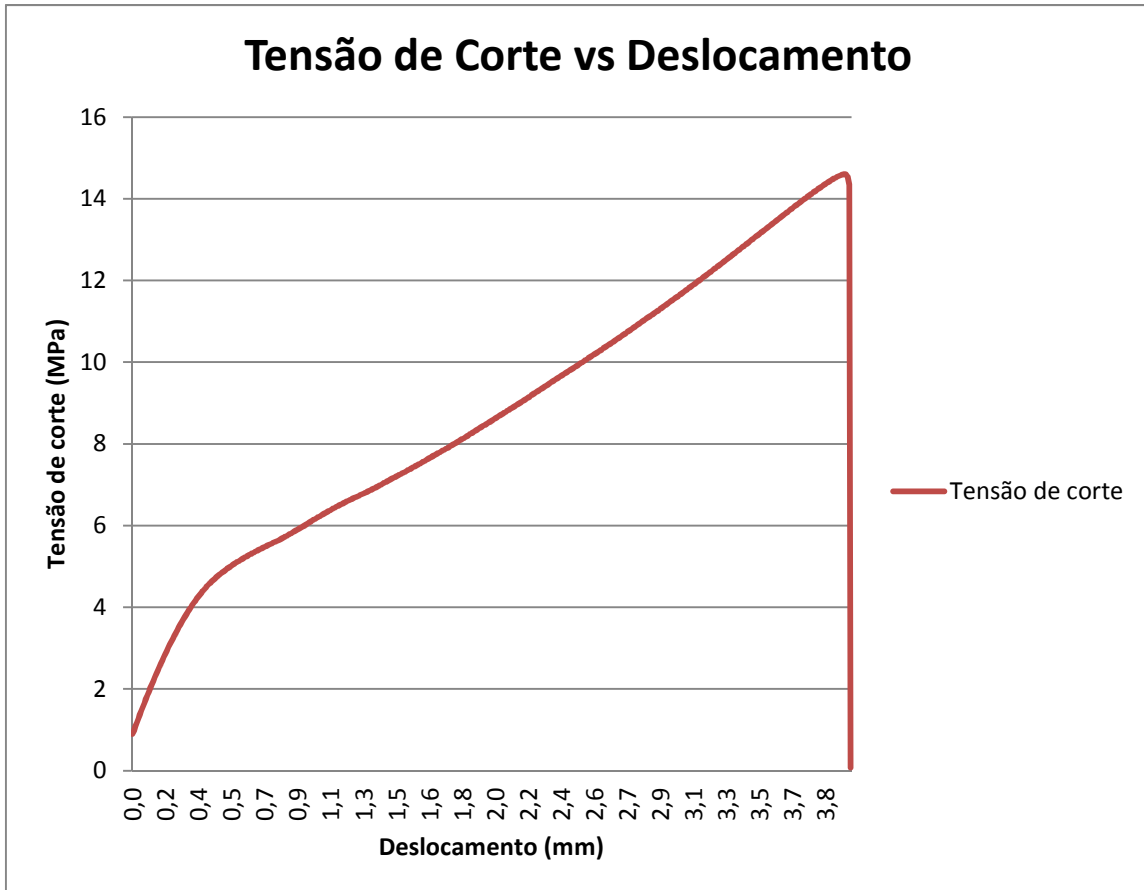
Provete 4:

Dados do provete	
Comprimento de sobreposição (mm)	15,8
Largura de sobreposição (mm)	20,4
Força máxima Aplicada (N)	3785,55
Tensão de corte Máxima (MPa)	11,75



Provete 5:

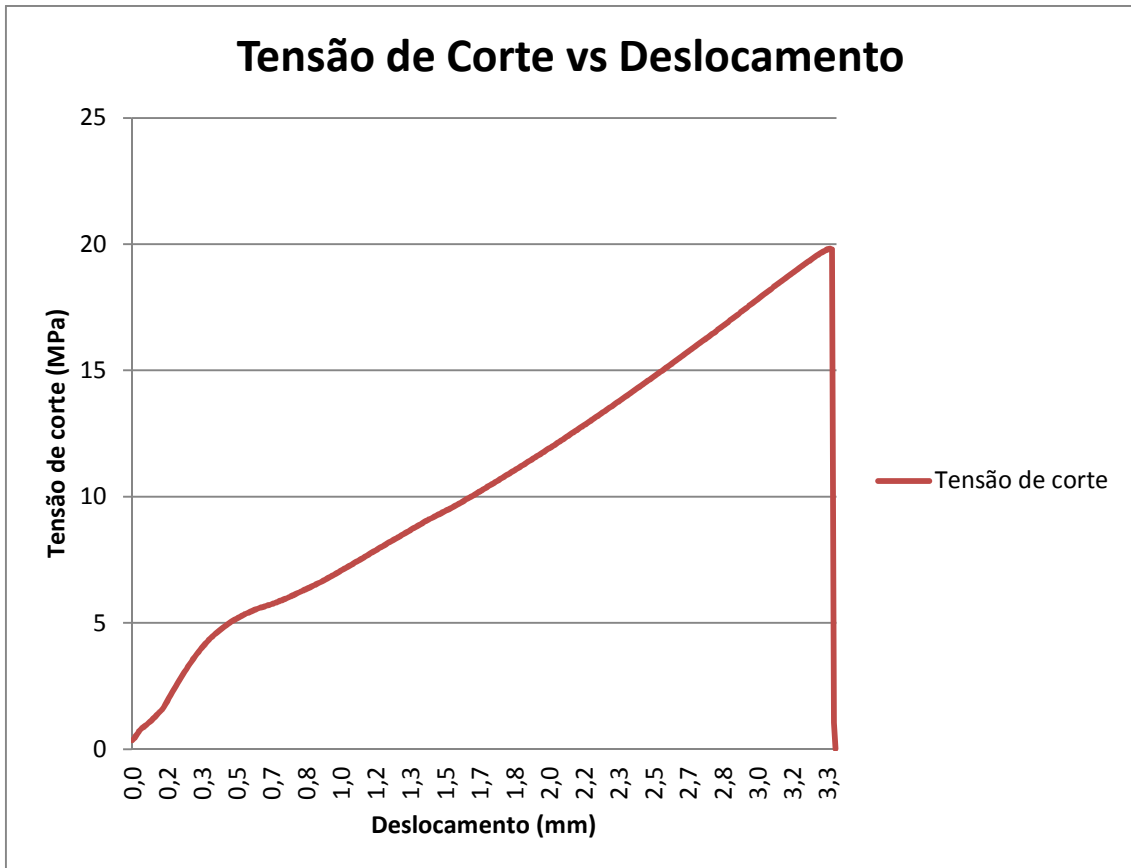
Dados do provete	
Comprimento de sobreposição (mm)	17,3
Largura de sobreposição (mm)	20,4
Força máxima Aplicada (N)	5153,13
Tensão de corte Máxima (MPa)	14,60



25 min @ 510K

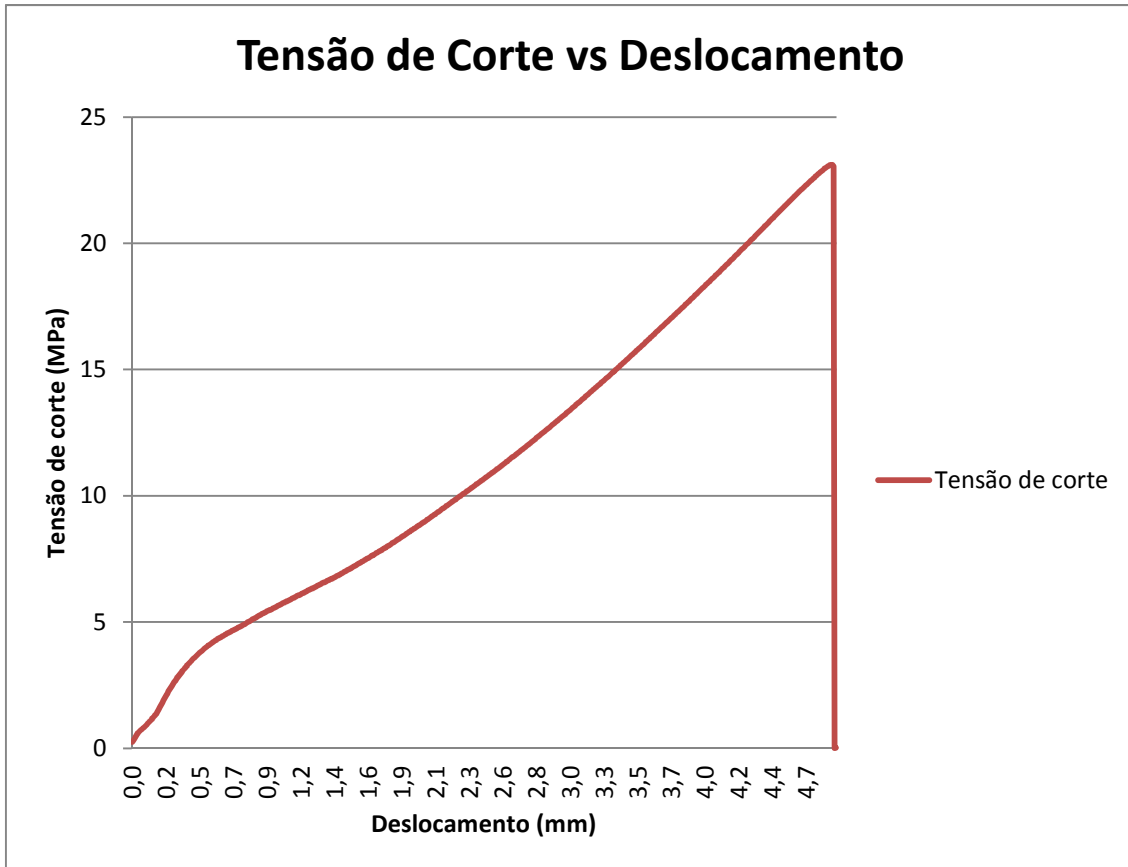
Provete 1:

Dados do provete	
Comprimento de sobreposição (mm)	13,5
Largura de sobreposição (mm)	20,8
Força máxima Aplicada (N)	5564,75
Tensão de corte Máxima (MPa)	19,82



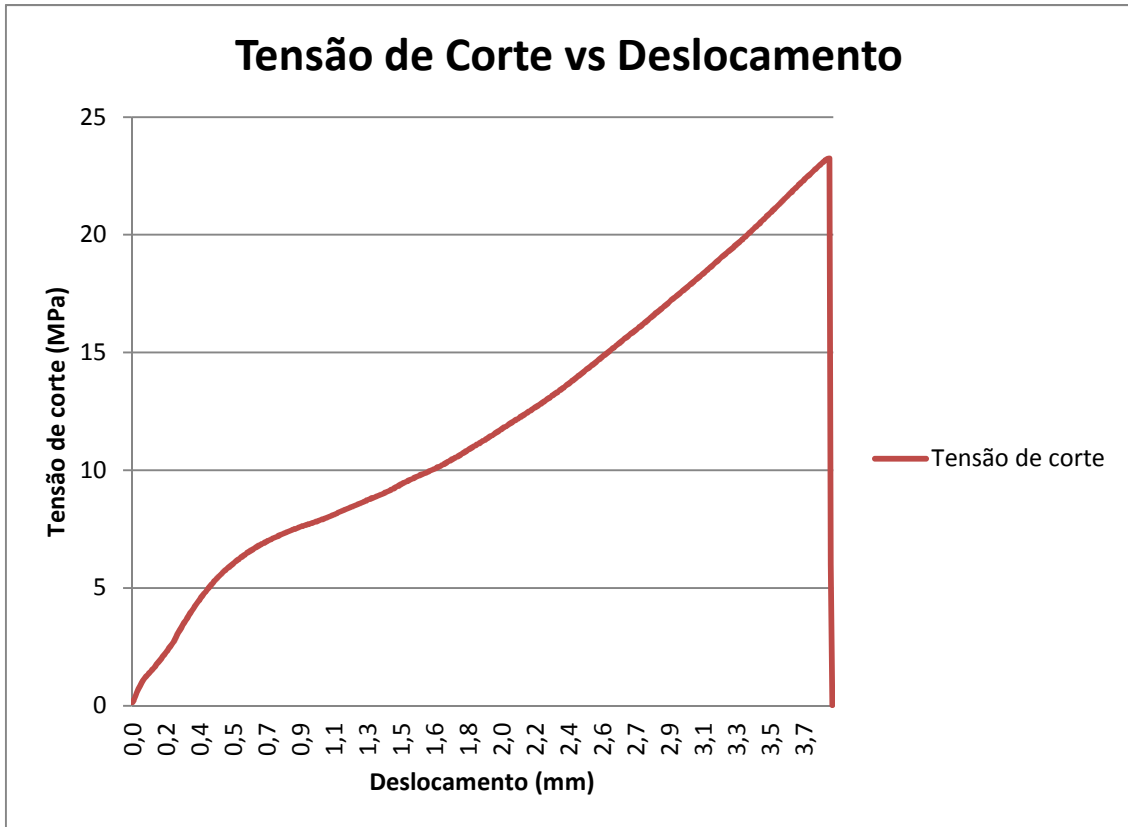
Provete 2:

Dados do provete	
Comprimento de sobreposição (mm)	16,7
Largura de sobreposição (mm)	20,3
Força máxima Aplicada (N)	7833,20
Tensão de corte Máxima (MPa)	23,11



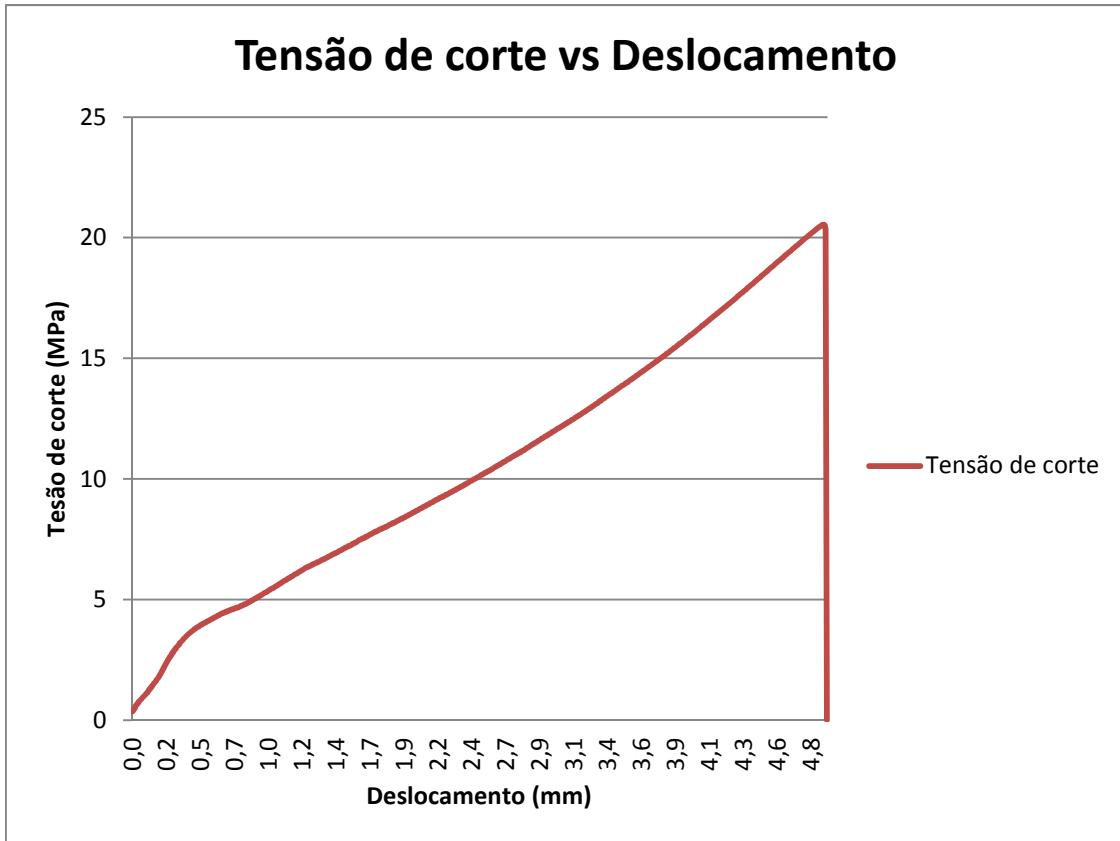
**Provete 3:**

Dados do provete	
Comprimento de sobreposição (mm)	8,93
Largura de sobreposição (mm)	19,6
Força máxima Aplicada (N)	4067,33
Tensão de corte Máxima (MPa)	23,24



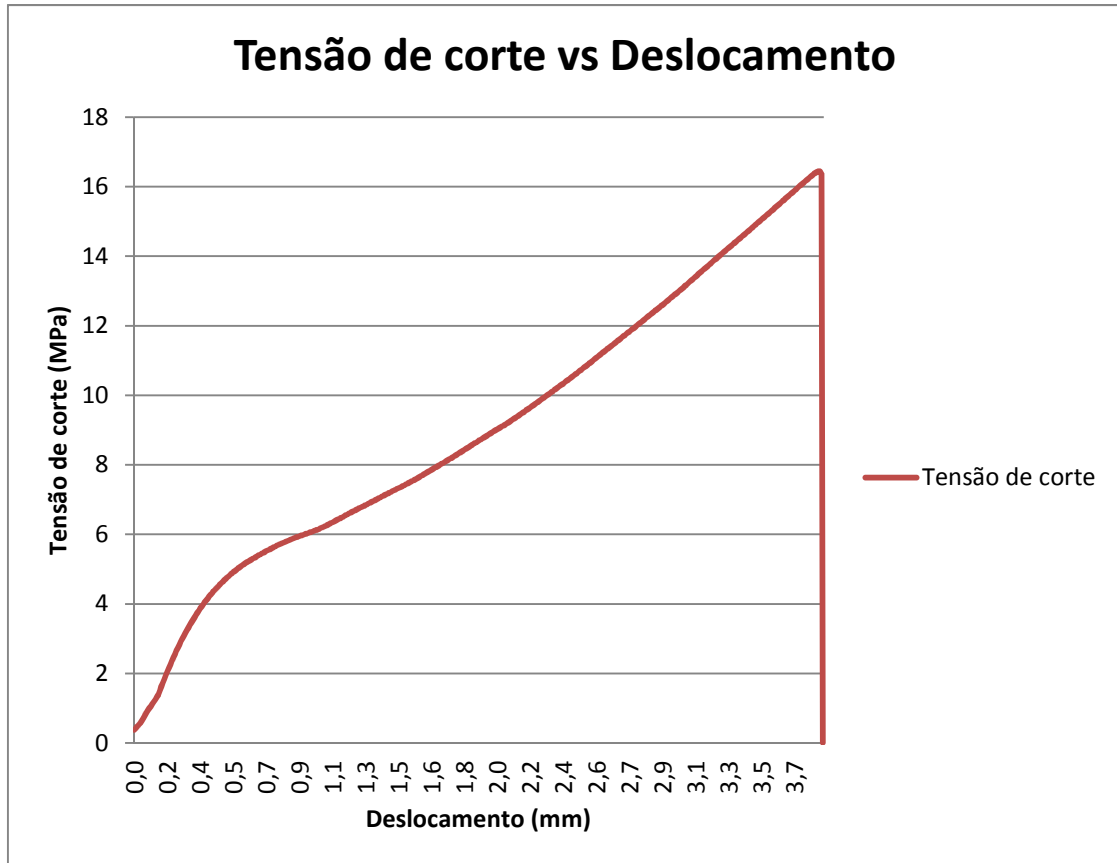
Provete 4:

Dados do provete	
Comprimento de sobreposição (mm)	15,5
Largura de sobreposição (mm)	20,3
Força máxima Aplicada (N)	6461,46
Tensão de corte Máxima (MPa)	20,54



Provete 5:

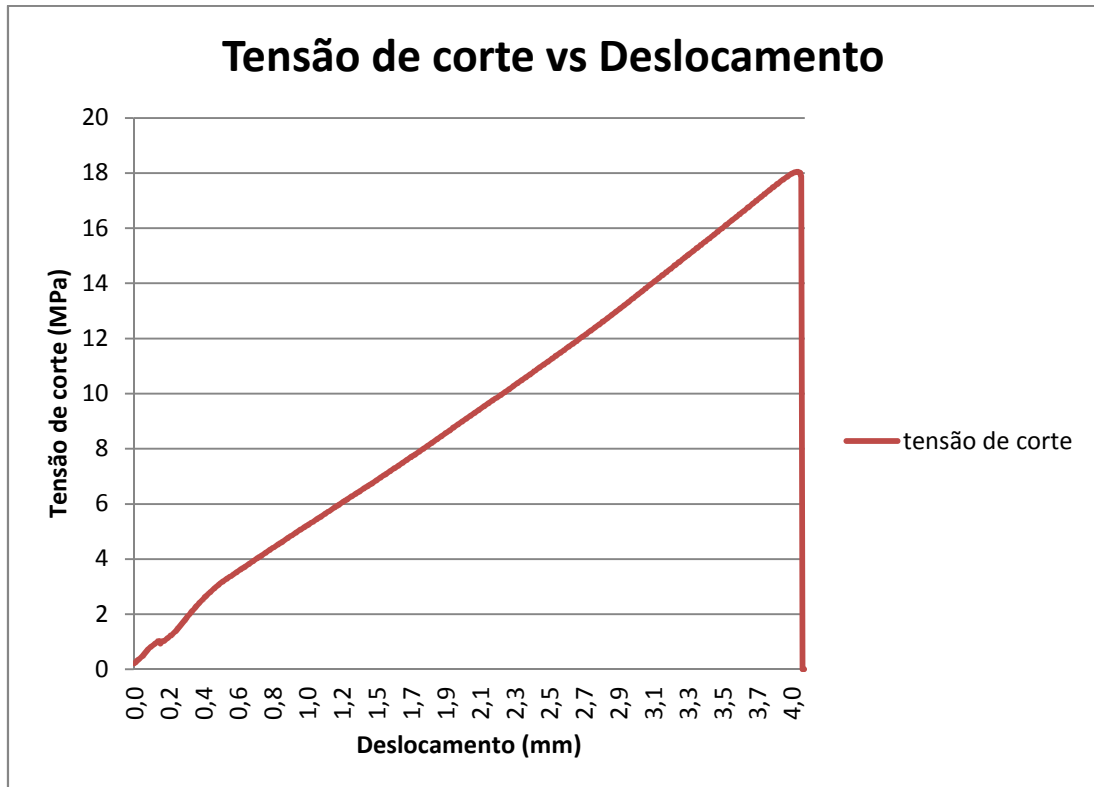
Dados do provete	
Comprimento de sobreposição (mm)	16,1
Largura de sobreposição (mm)	20,7
Força máxima Aplicada (N)	5480,93
Tensão de corte Máxima (MPa)	16,45



28 min @510 K

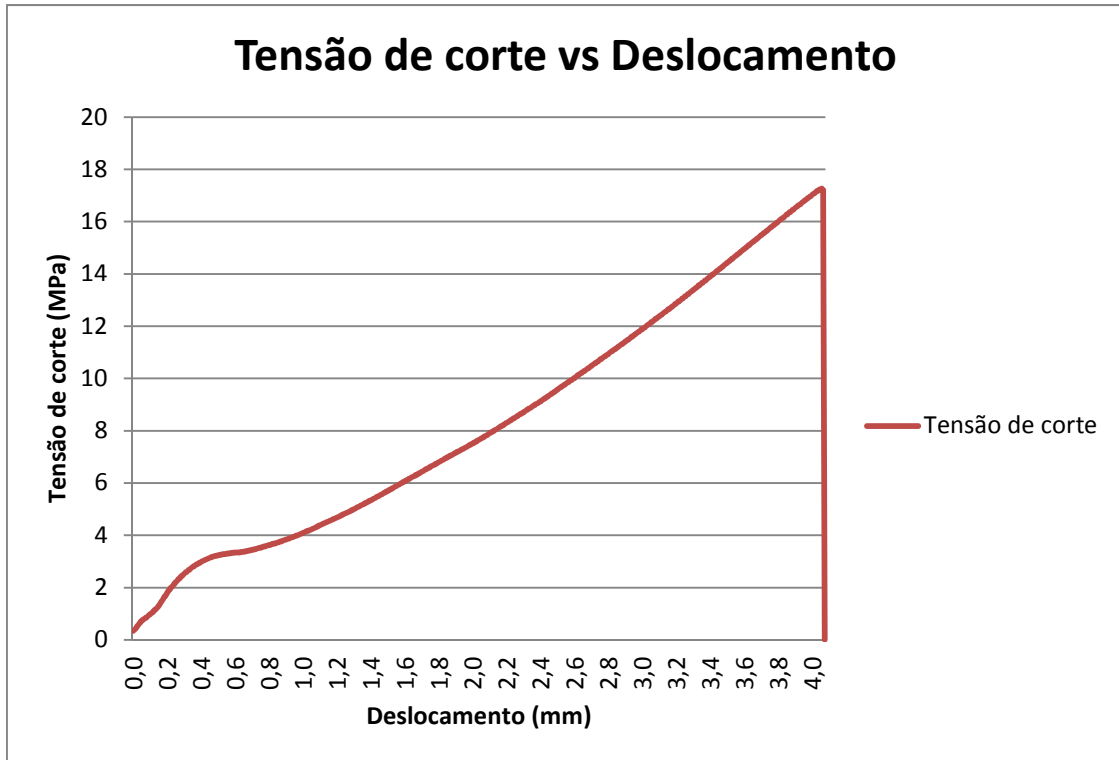
Provete 1:

Dados do provete	
Comprimento de sobreposição (mm)	16,1
Largura de sobreposição (mm)	22,6
Força máxima Aplicada (N)	6567,70
Tensão de corte Máxima (MPa)	18,05



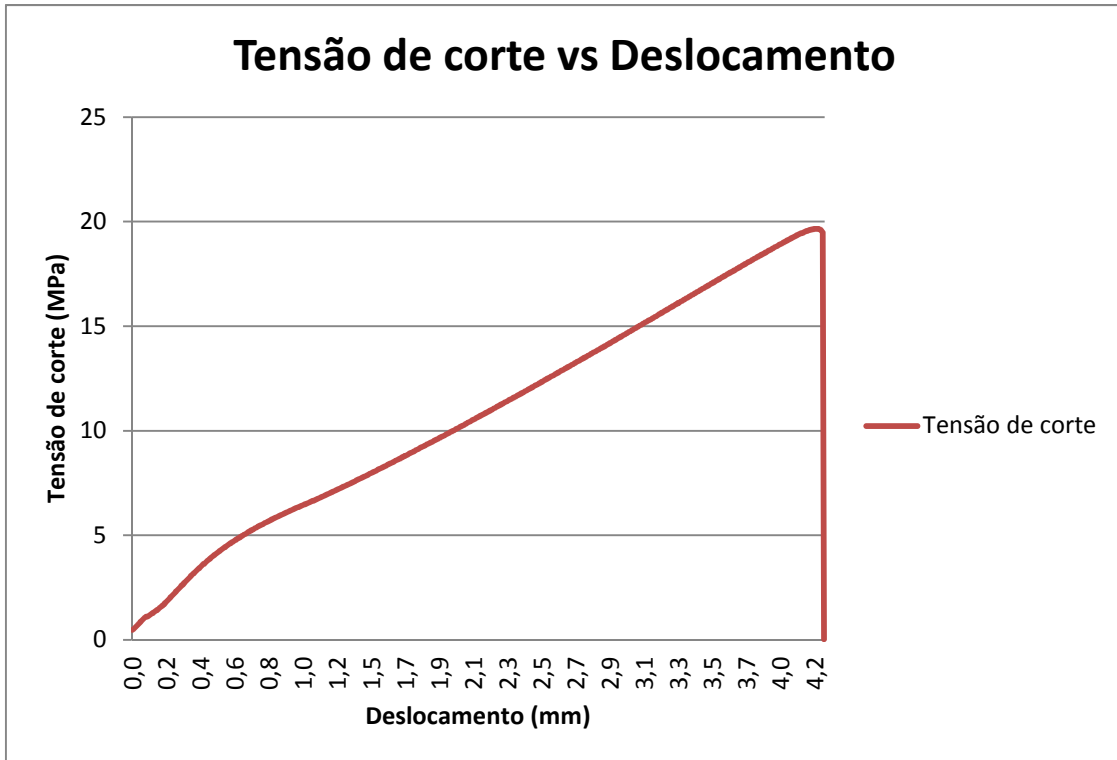
**Provete 2:**

<b>Dados do provete</b>	
<b>Comprimento de sobreposição (mm)</b>	16,7
<b>Largura de sobreposição (mm)</b>	22,4
<b>Força máxima Aplicada (N)</b>	6457,04
<b>Tensão de corte Máxima (MPa)</b>	17,26



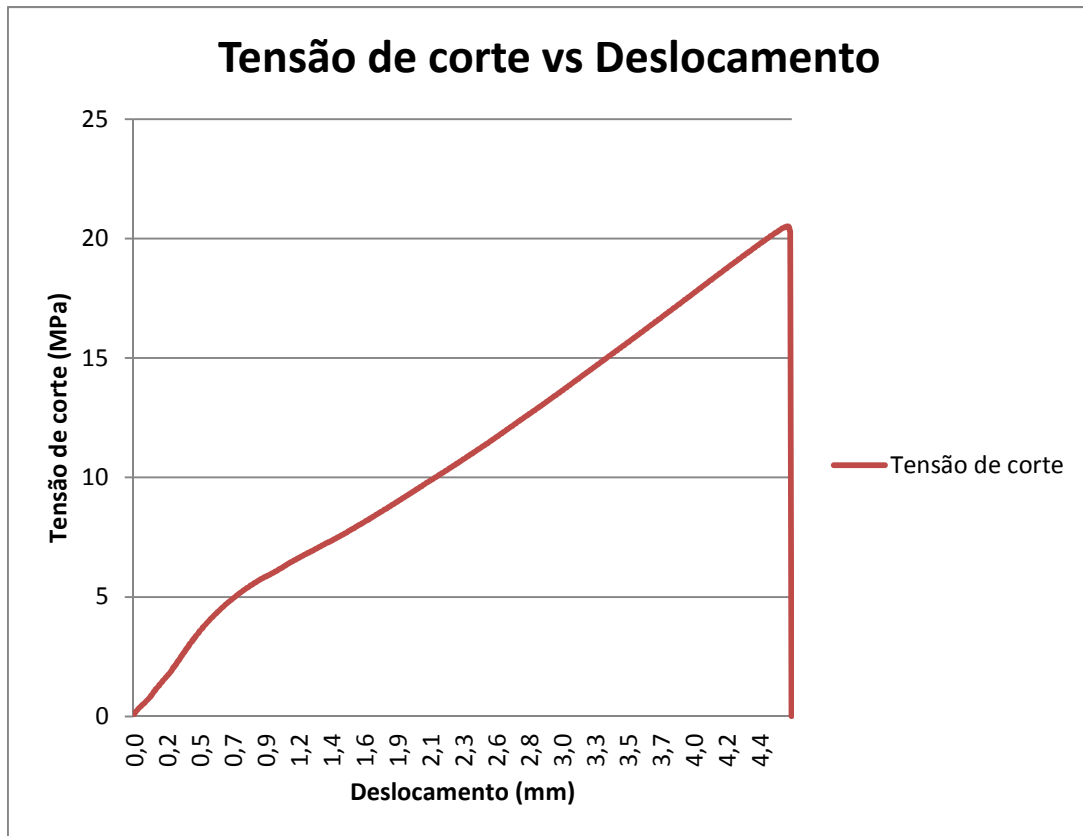
**Provete 3:**

<b>Dados do provete</b>	
<b>Comprimento de sobreposição (mm)</b>	17,1
<b>Largura de sobreposição (mm)</b>	22,4
<b>Força máxima Aplicada (N)</b>	7529,24
<b>Tensão de corte Máxima (MPa)</b>	19,66



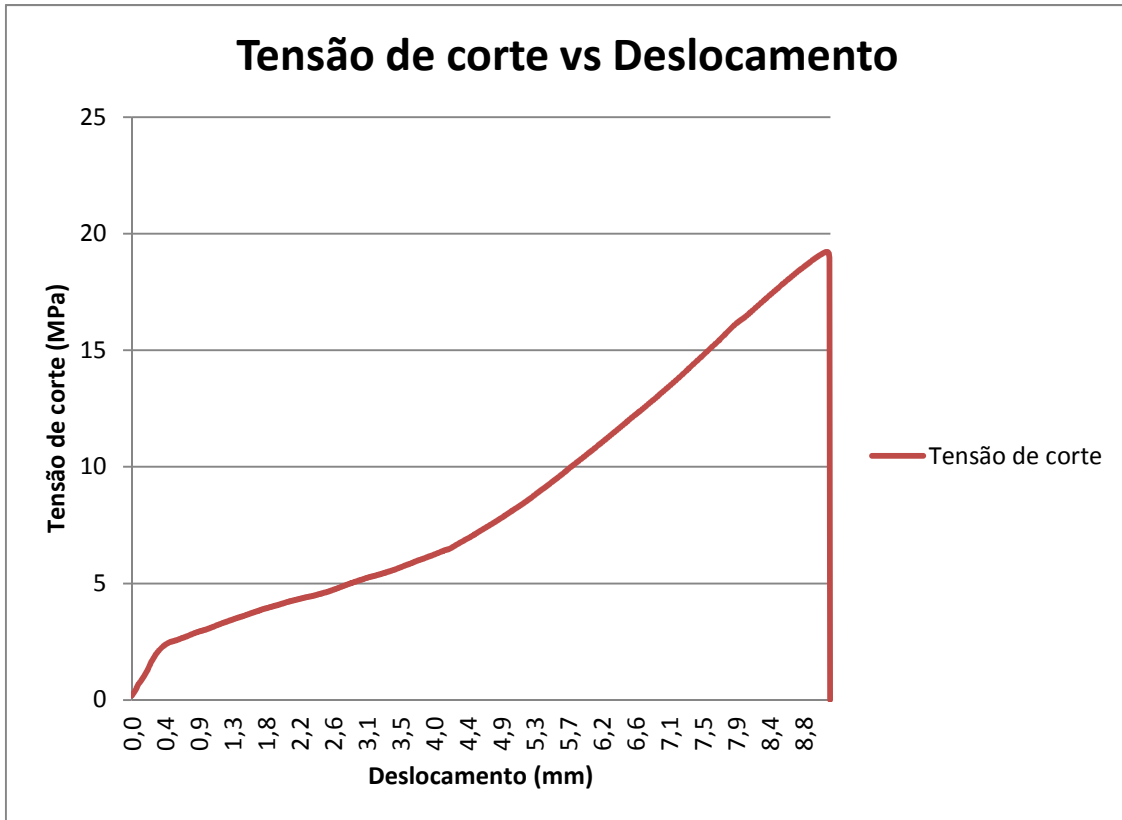
Provete 4:

Dados do provete	
Comprimento de sobreposição (mm)	16,7
Largura de sobreposição (mm)	22,4
Força máxima Aplicada (N)	7671,93
Tensão de corte Máxima (MPa)	20,51



**Provete 5:**

<b>Dados do provete</b>	
<b>Comprimento de sobreposição (mm)</b>	17,8
<b>Largura de sobreposição (mm)</b>	22,6
<b>Força máxima Aplicada (N)</b>	7731,80
<b>Tensão de corte Máxima (MPa)</b>	19,22

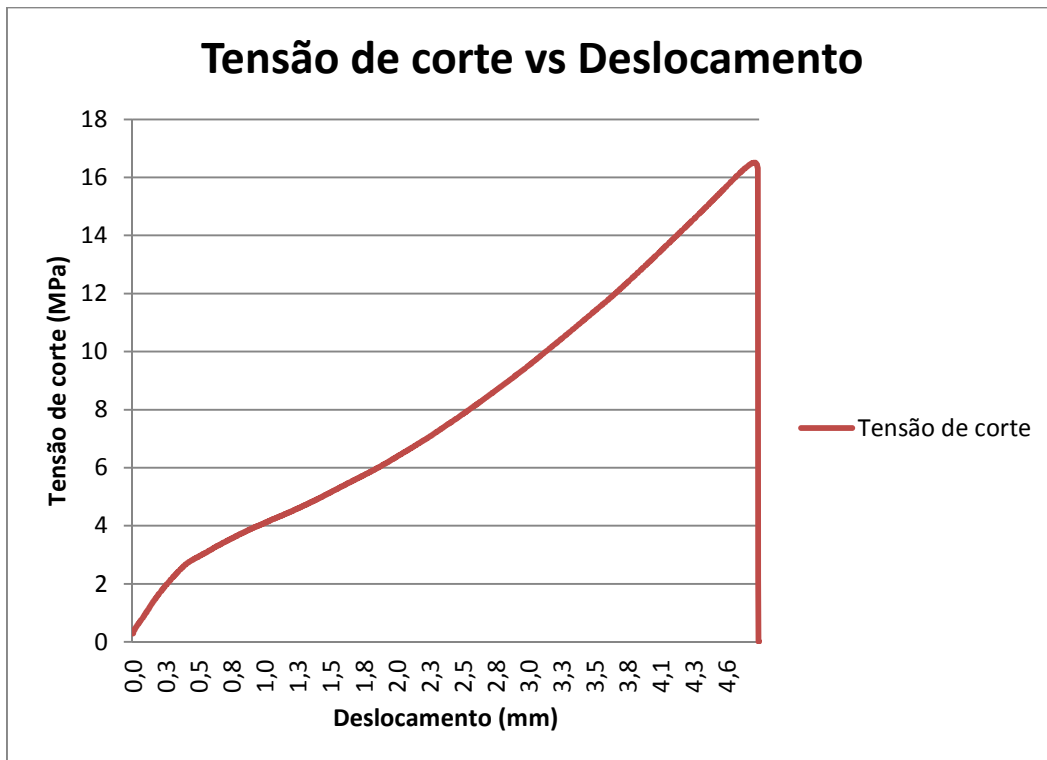


# Ensaio 550 K

11 min @ 550 K

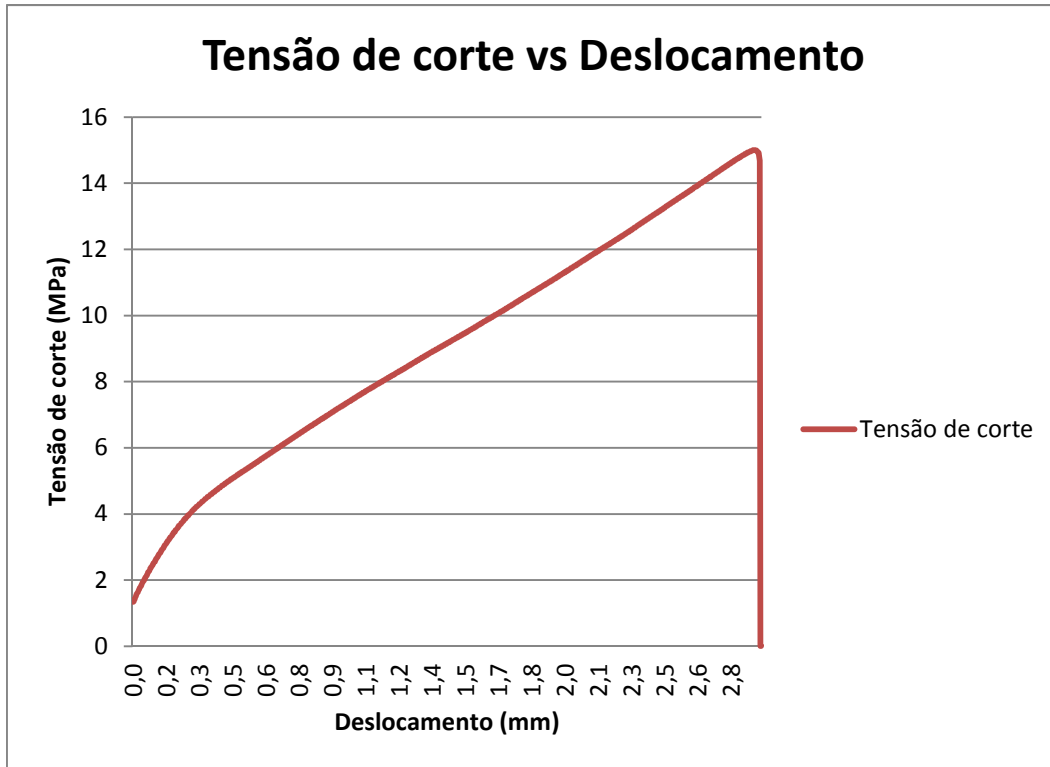
Provete 1:

Dados do provete	
Comprimento de sobreposição (mm)	15,5
Largura de sobreposição (mm)	22,4
Força máxima Aplicada (N)	5731,76
Tensão de corte Máxima (MPa)	16,51



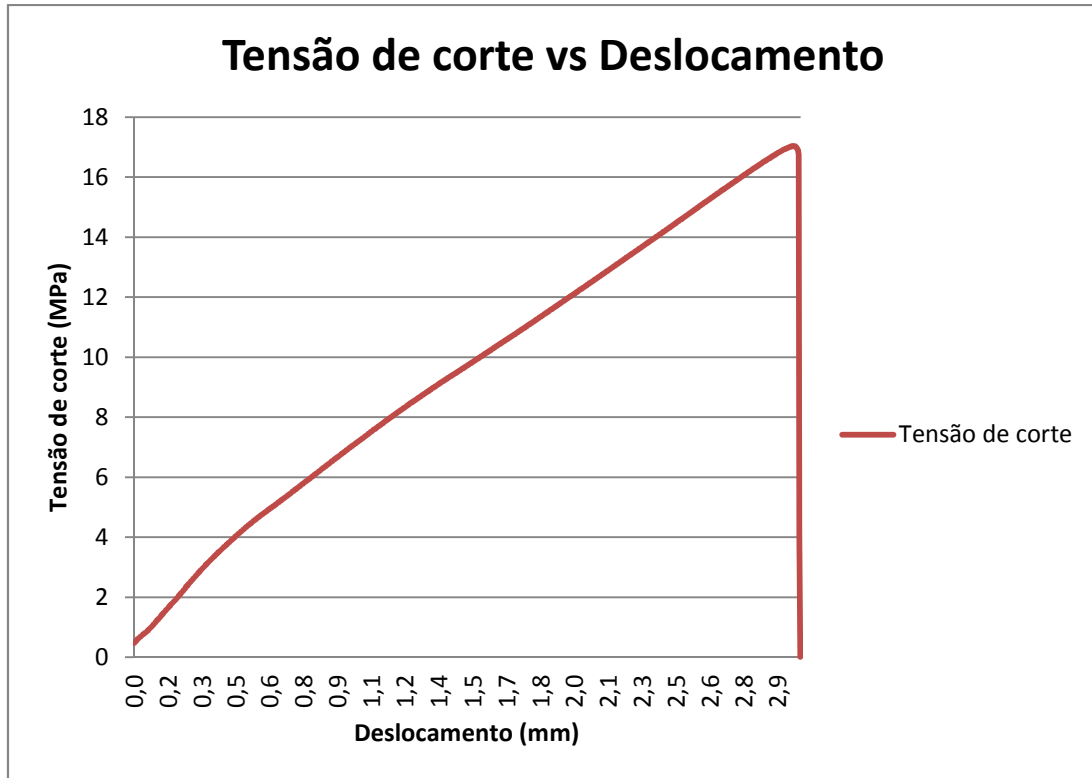
**Provete 2:**

<b>Dados do provete</b>	
<b>Comprimento de sobreposição (mm)</b>	16,8
<b>Largura de sobreposição (mm)</b>	22,4
<b>Força máxima Aplicada (N)</b>	5645,23
<b>Tensão de corte Máxima (MPa)</b>	15,01



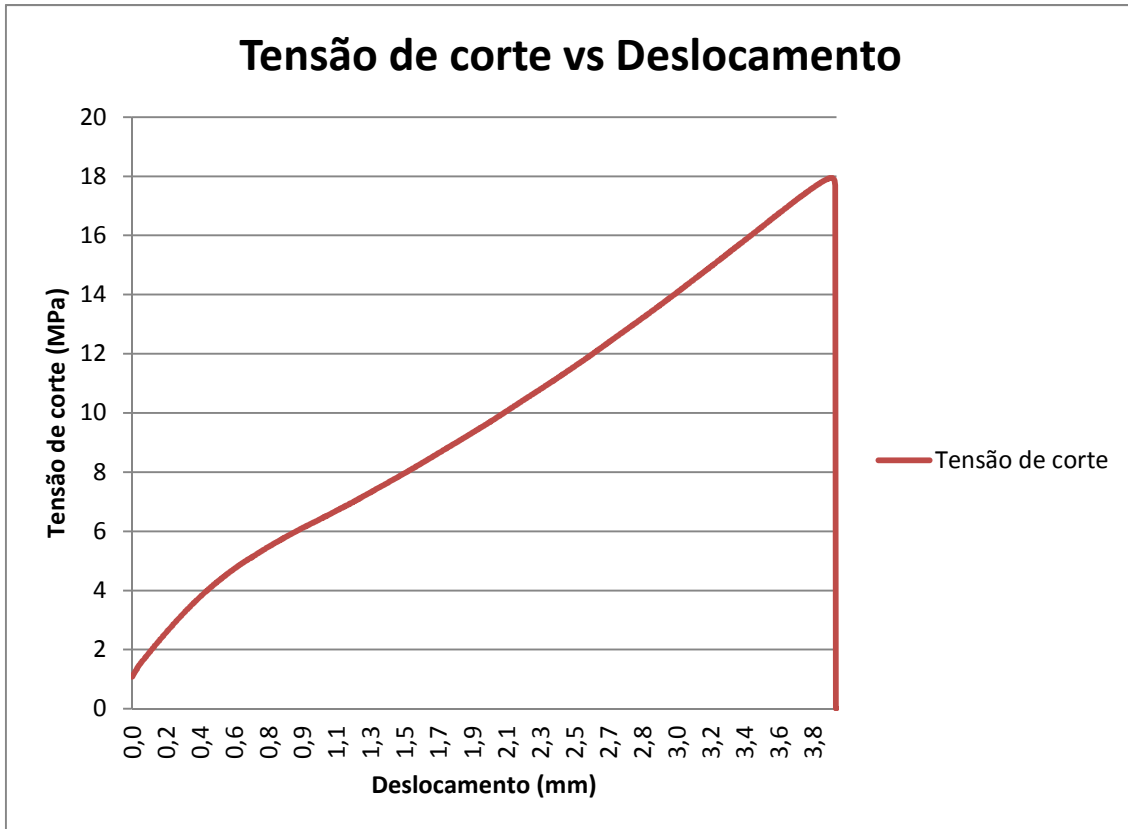
**Provete 3:**

Dados do provete	
Comprimento de sobreposição (mm)	17,2
Largura de sobreposição (mm)	22,4
Força máxima Aplicada (N)	6562,63
Tensão de corte Máxima (MPa)	17,03



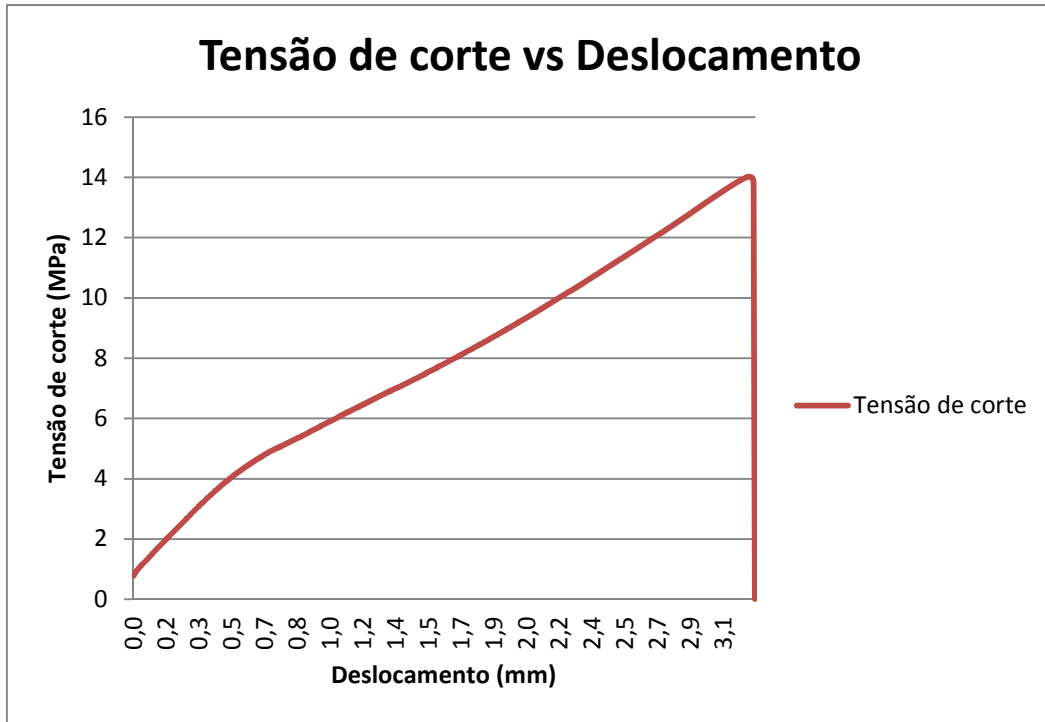
**Provete 4:**

Dados do provete	
Comprimento de sobreposição (mm)	17,3
Largura de sobreposição (mm)	22,4
Força máxima Aplicada (N)	6953,18
Tensão de corte Máxima (MPa)	17,94



Provete 5:

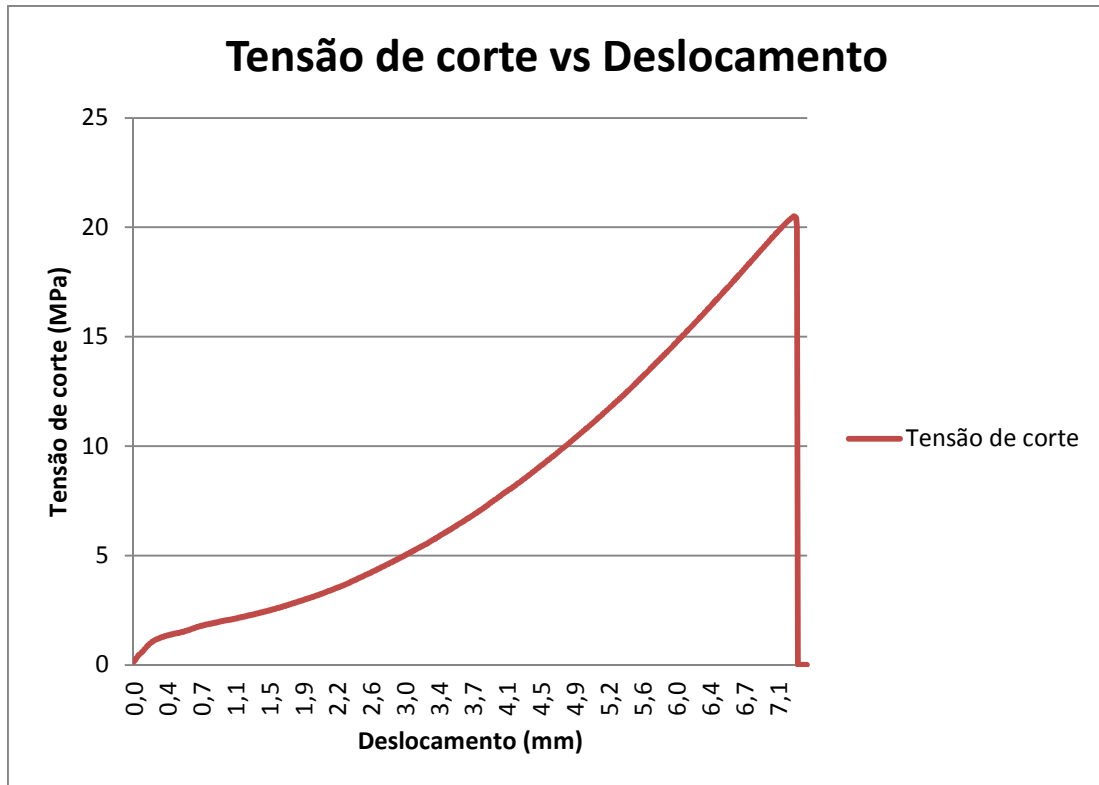
Dados do provete	
Comprimento de sobreposição (mm)	16,6
Largura de sobreposição (mm)	22,4
Força máxima Aplicada (N)	5213,36
Tensão de corte Máxima (MPa)	14,02



13 min @ 510 K

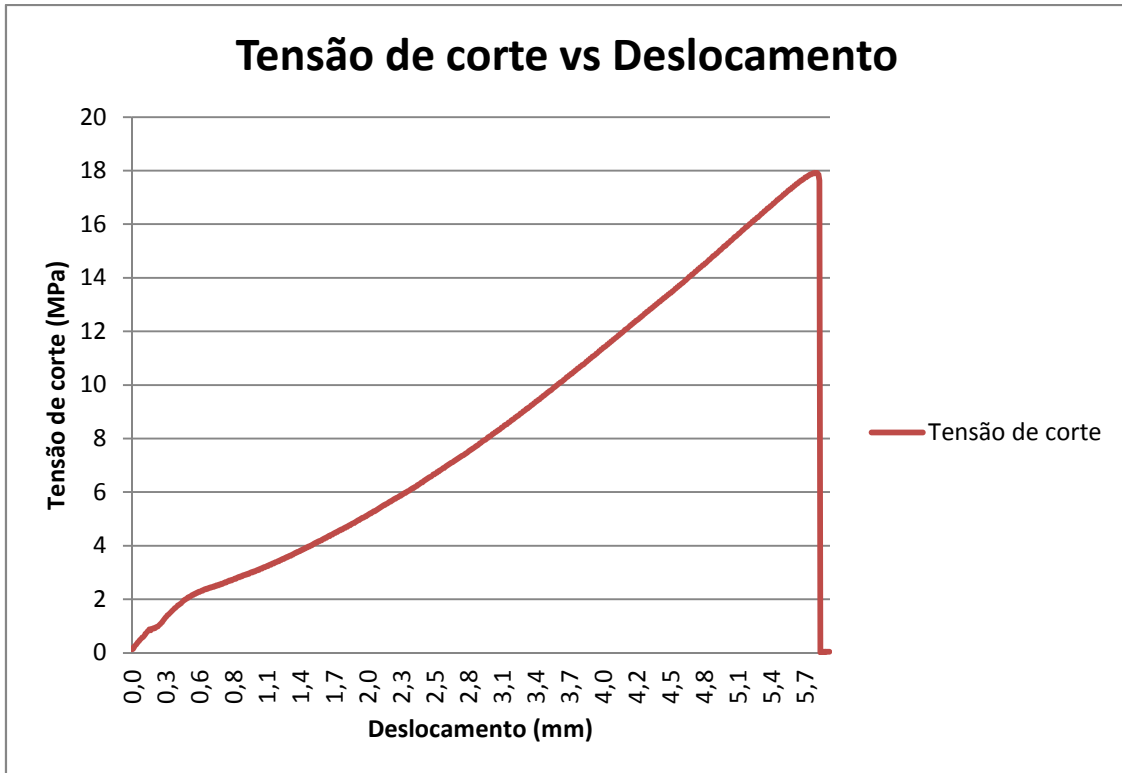
Provete 2:

Dados do provete	
Comprimento de sobreposição (mm)	16,3
Largura de sobreposição (mm)	22,5
Força máxima Aplicada (N)	7519,60
Tensão de corte Máxima (MPa)	20,50



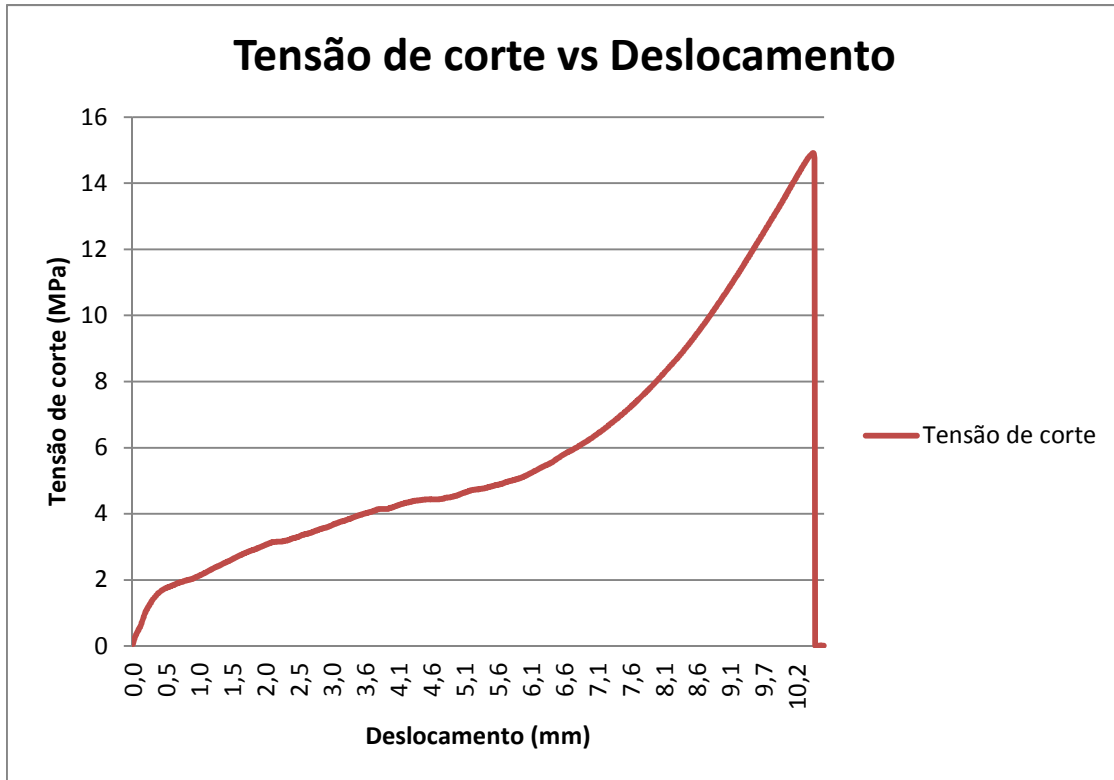
**Provete 3:**

Dados do provete	
Comprimento de sobreposição (mm)	16,5
Largura de sobreposição (mm)	22,4
Força máxima Aplicada (N)	6620,61
Tensão de corte Máxima (MPa)	17,91



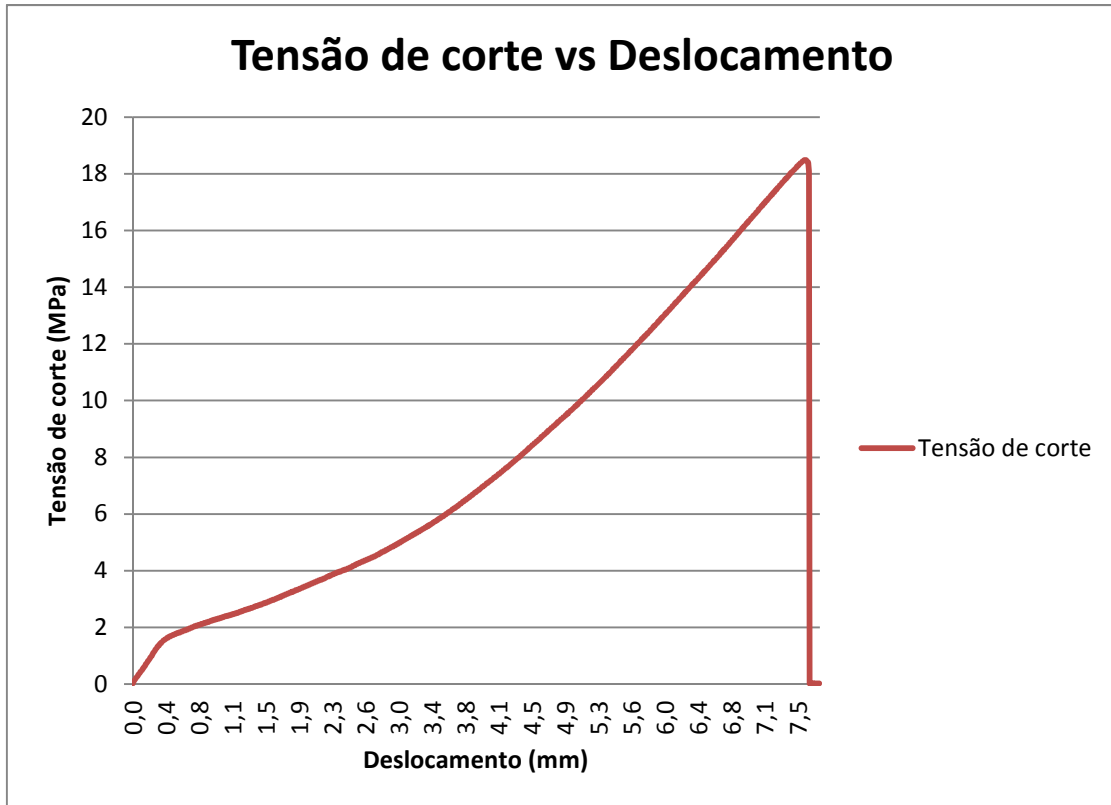
**Provete 4:**

Dados do provete	
Comprimento de sobreposição (mm)	16,5
Largura de sobreposição (mm)	22,5
Força máxima Aplicada (N)	5536,68
Tensão de corte Máxima (MPa)	14,91



Provete 5:

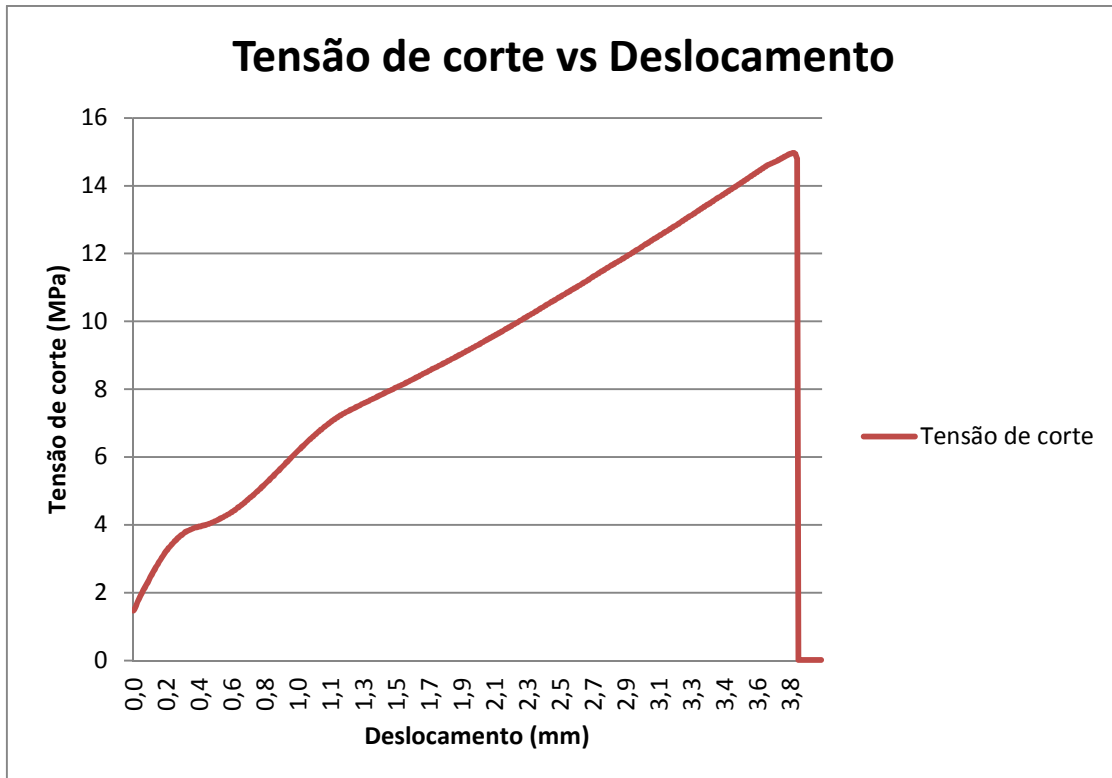
Dados do provete	
Comprimento de sobreposição (mm)	17,4
Largura de sobreposição (mm)	22,5
Força máxima Aplicada (N)	7236,62
Tensão de corte Máxima (MPa)	18,48



**15 min @ 550 K**

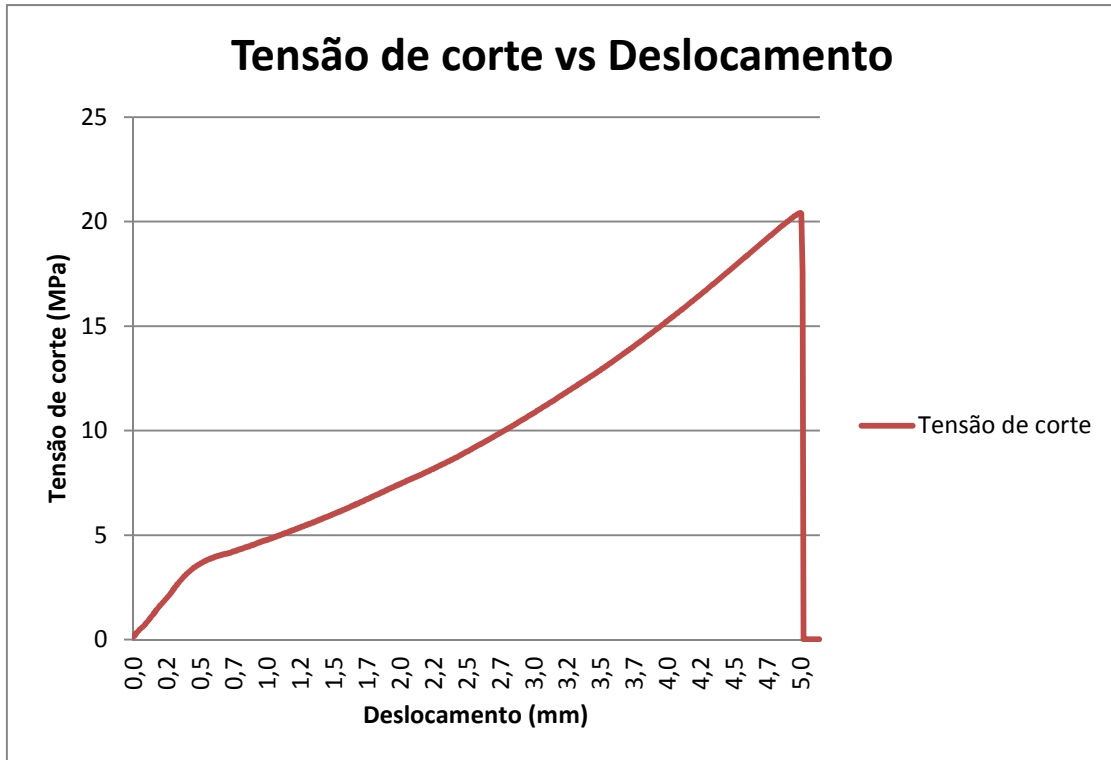
**Provete 1:**

<b>Dados do provete</b>	
<b>Comprimento de sobreposição (mm)</b>	16,5
<b>Largura de sobreposição (mm)</b>	22,5
<b>Força máxima Aplicada (N)</b>	5536,68
<b>Tensão de corte Máxima (MPa)</b>	14,91



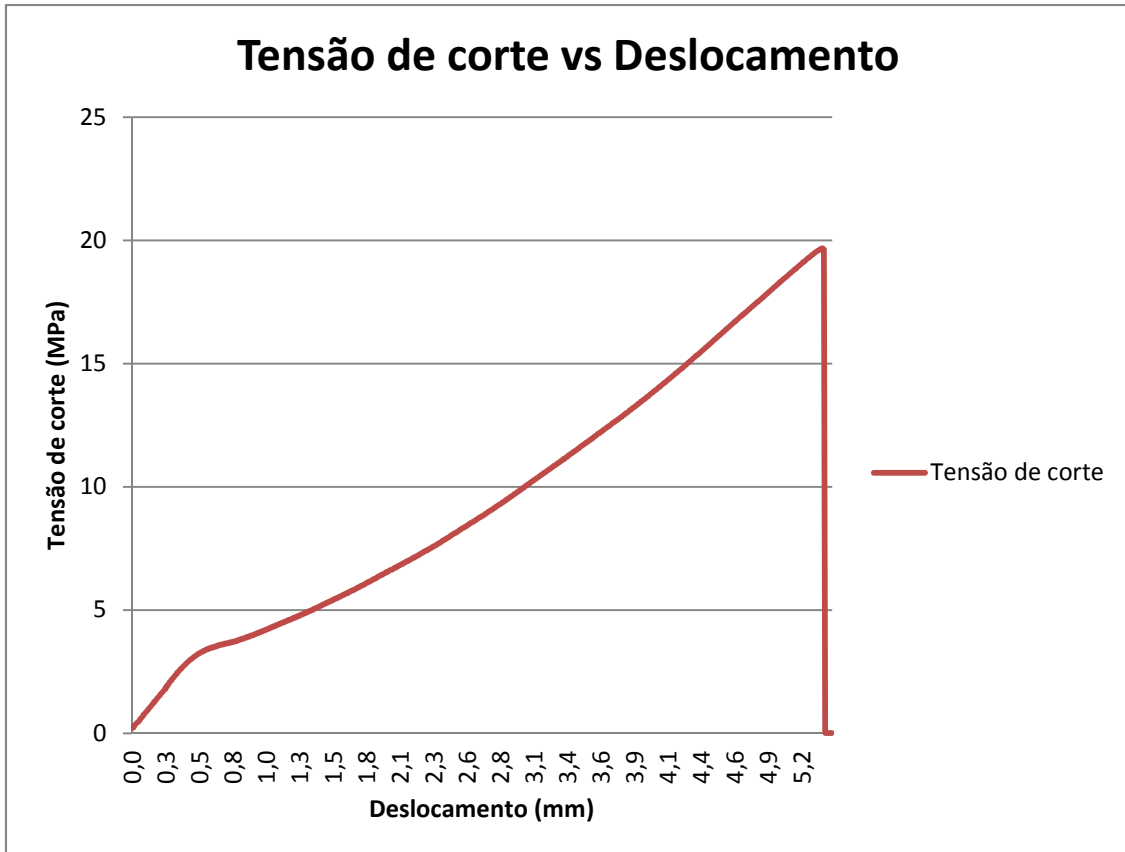
**Provete 2:**

<b>Dados do provete</b>	
<b>Comprimento de sobreposição (mm)</b>	14,8
<b>Largura de sobreposição (mm)</b>	22,6
<b>Força máxima Aplicada (N)</b>	6623,54
<b>Tensão de corte Máxima (MPa)</b>	20,40



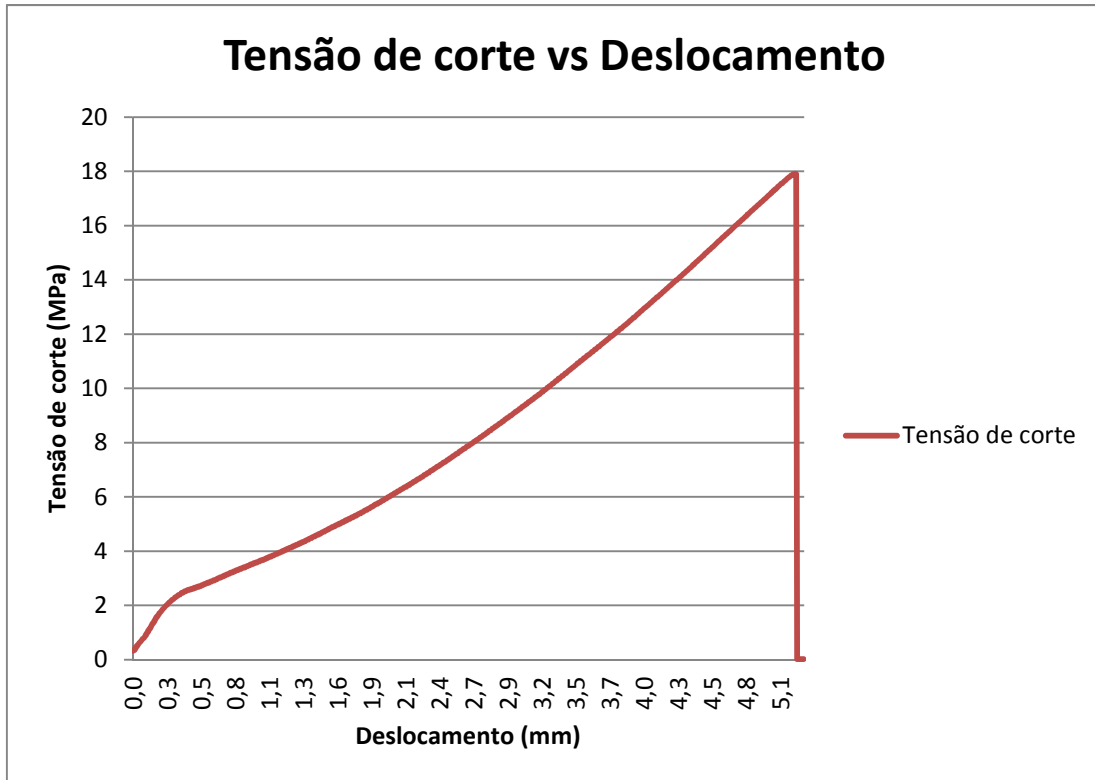
**Provete 3:**

Dados do provete	
Comprimento de sobreposição (mm)	17,3
Largura de sobreposição (mm)	22,5
Força máxima Aplicada (N)	7657,77
Tensão de corte Máxima (MPa)	19,67



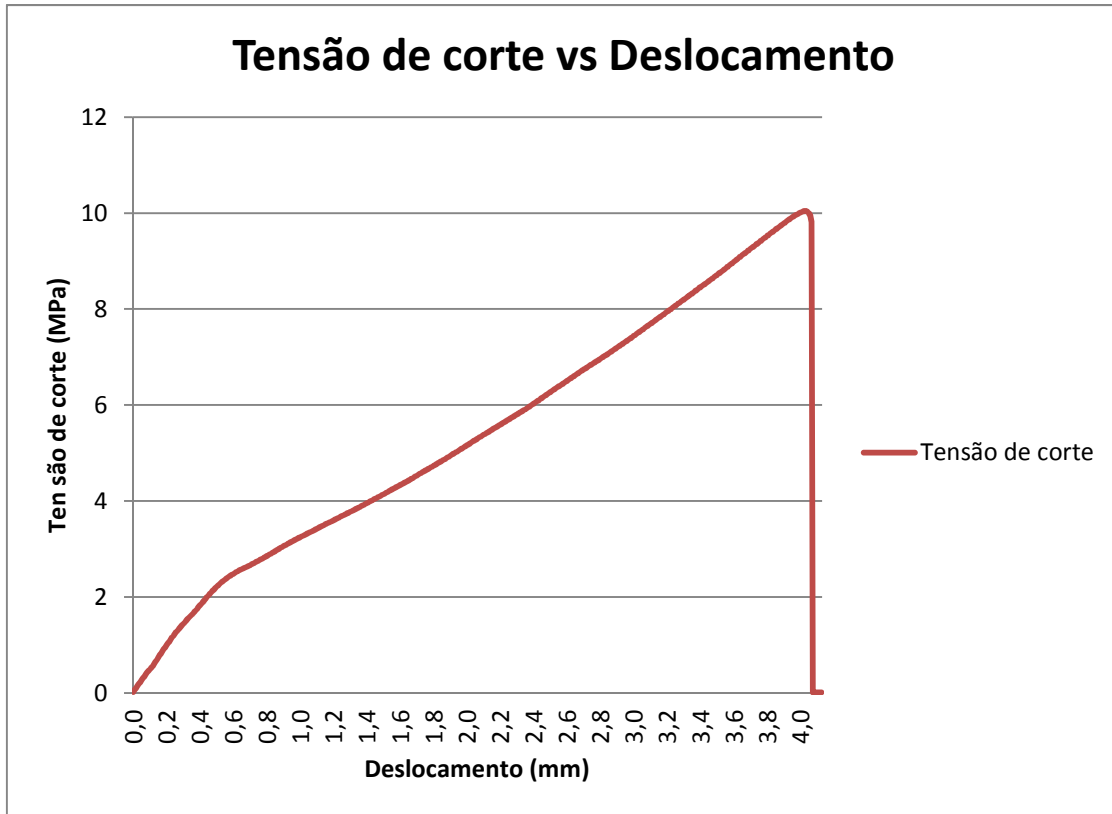
**Provete 4:**

Dados do provete	
Comprimento de sobreposição (mm)	16,5
Largura de sobreposição (mm)	22,3
Força máxima Aplicada (N)	6589,21
Tensão de corte Máxima (MPa)	17,91



Provete 5:

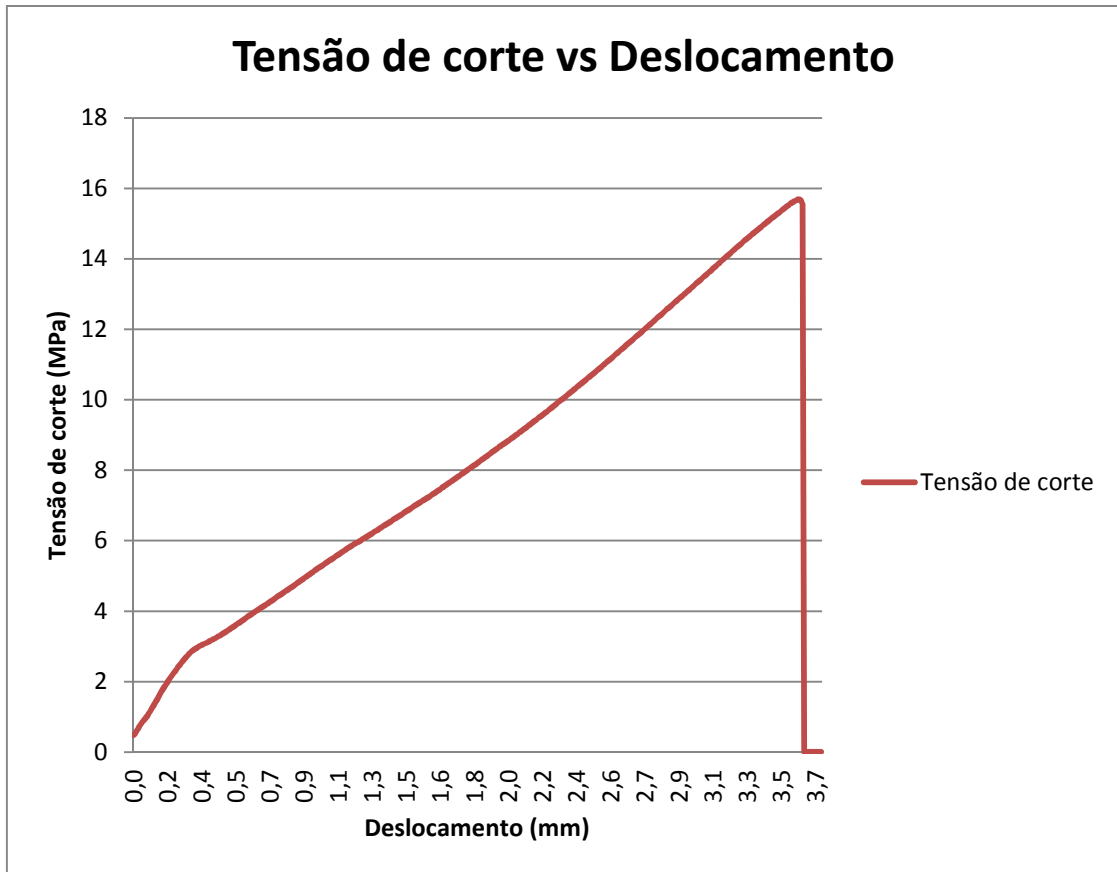
Dados do provete	
Comprimento de sobreposição (mm)	16,5
Largura de sobreposição (mm)	22,3
Força máxima Aplicada (N)	6589,21
Tensão de corte Máxima (MPa)	17,91



15 min @ 550 K

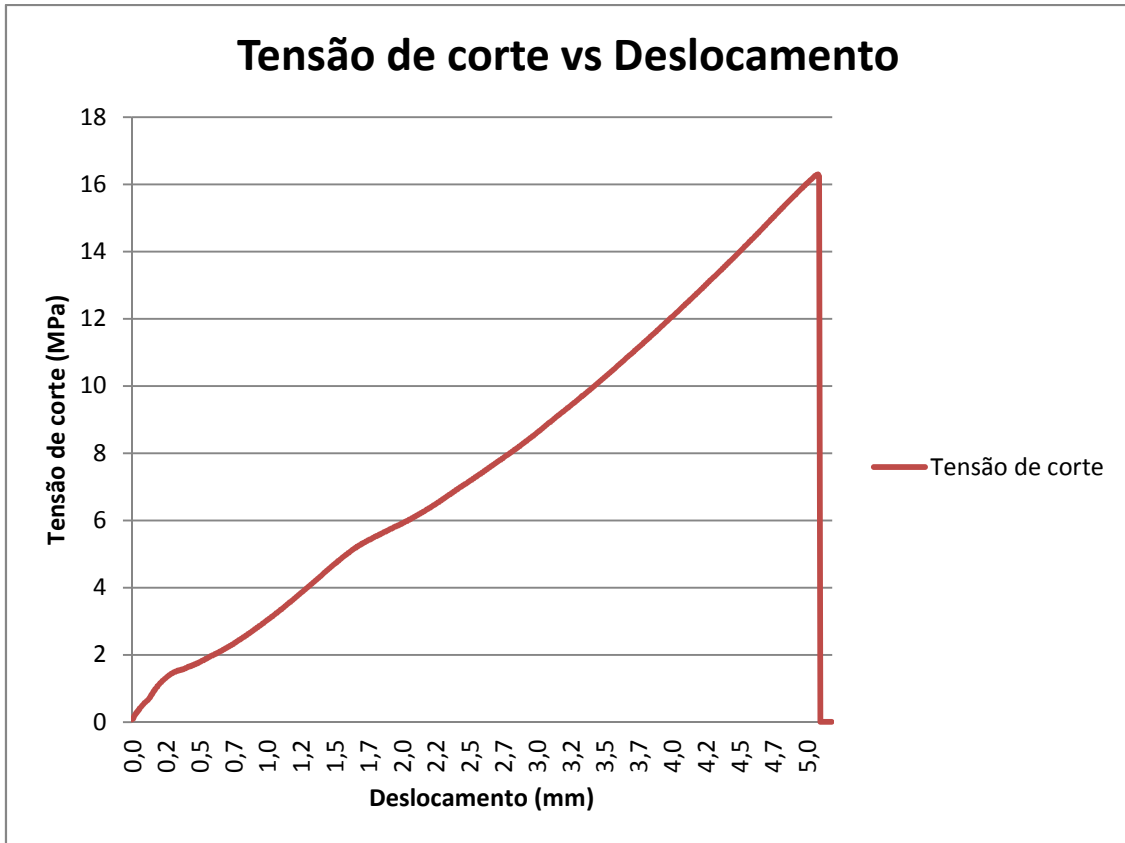
Provete 1:

Dados do provete	
Comprimento de sobreposição (mm)	15,3
Largura de sobreposição (mm)	22,5
Força máxima Aplicada (N)	5400,50
Tensão de corte Máxima (MPa)	15,69



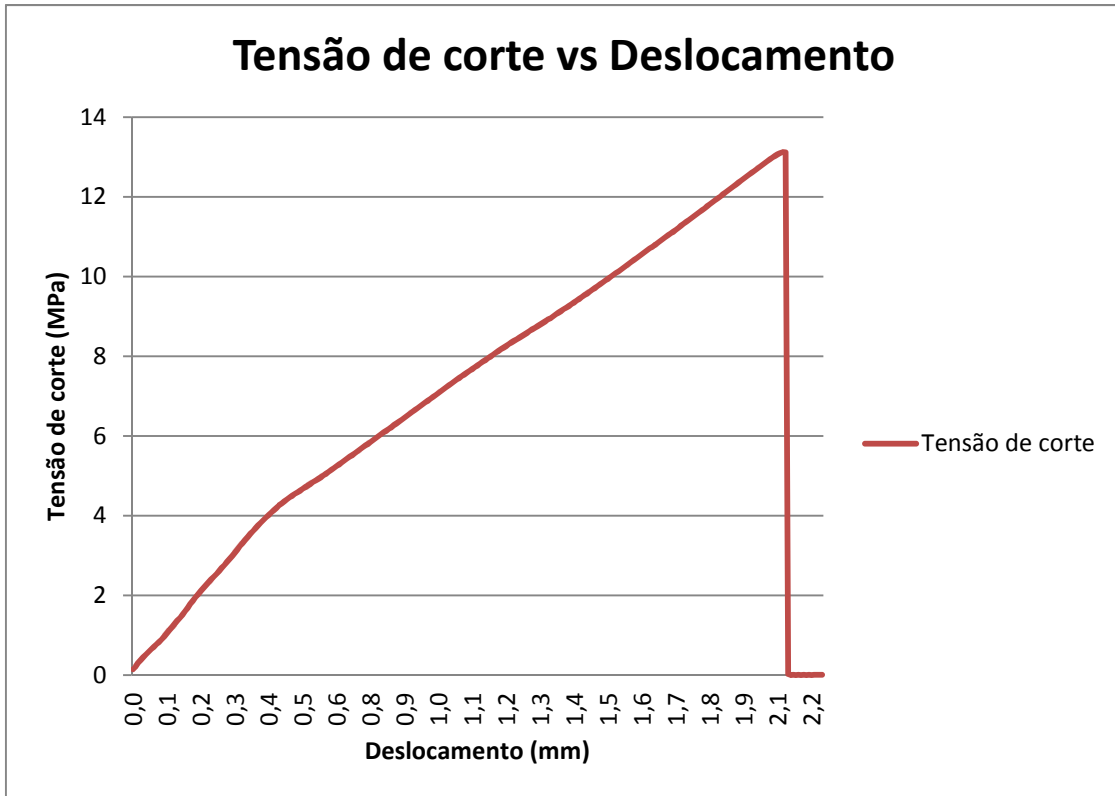
**Provete 2:**

<b>Dados do provete</b>	
<b>Comprimento de sobreposição (mm)</b>	17,5
<b>Largura de sobreposição (mm)</b>	22,5
<b>Força máxima Aplicada (N)</b>	6415,59
<b>Tensão de corte Máxima (MPa)</b>	16,29



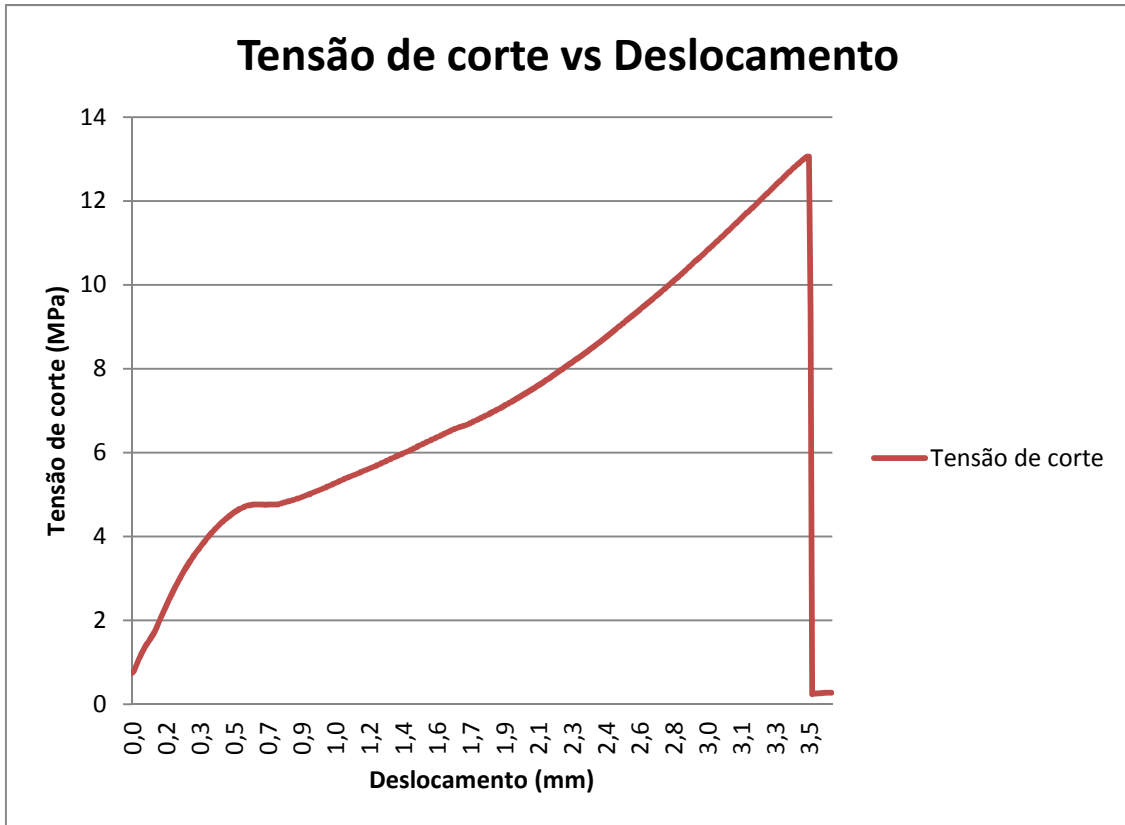
**Provete 3:**

Dados do provete	
Comprimento de sobreposição (mm)	11,3
Largura de sobreposição (mm)	22,5
Força máxima Aplicada (N)	3336,59
Tensão de corte Máxima (MPa)	13,12



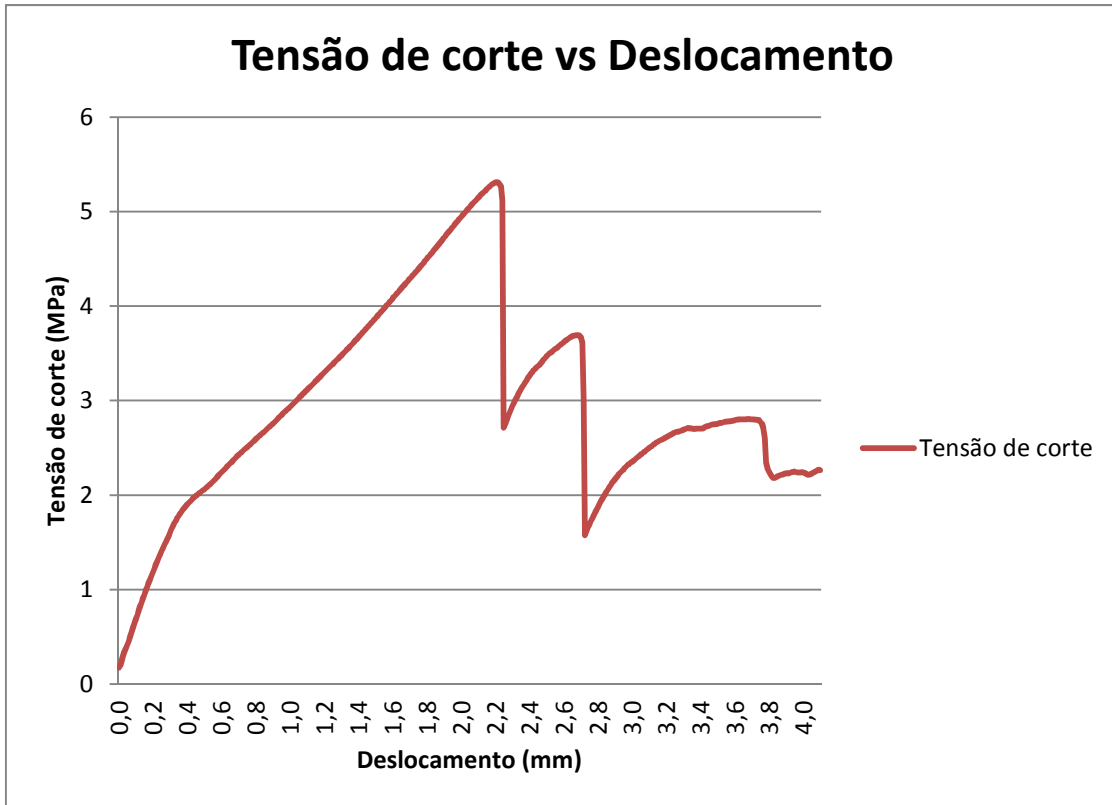
**Provete 4:**

<b>Dados do provete</b>	
<b>Comprimento de sobreposição (mm)</b>	15,3
<b>Largura de sobreposição (mm)</b>	22,5
<b>Força máxima Aplicada (N)</b>	4496,69
<b>Tensão de corte Máxima (MPa)</b>	13,06



Provete 5:

Dados do provete	
Comprimento de sobreposição (mm)	18,6
Largura de sobreposição (mm)	22,5
Força máxima Aplicada (N)	2222,62
Tensão de corte Máxima (MPa)	5,31

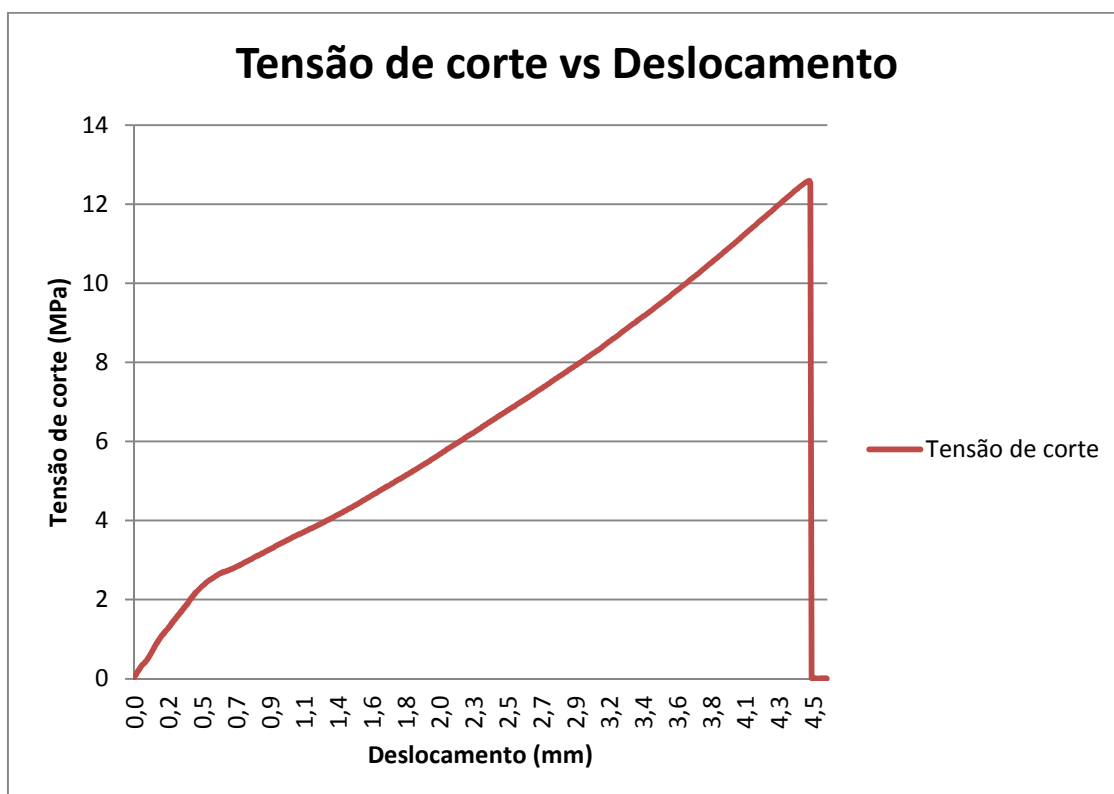


# Ensaio a 590 K

7 min @ 590 K

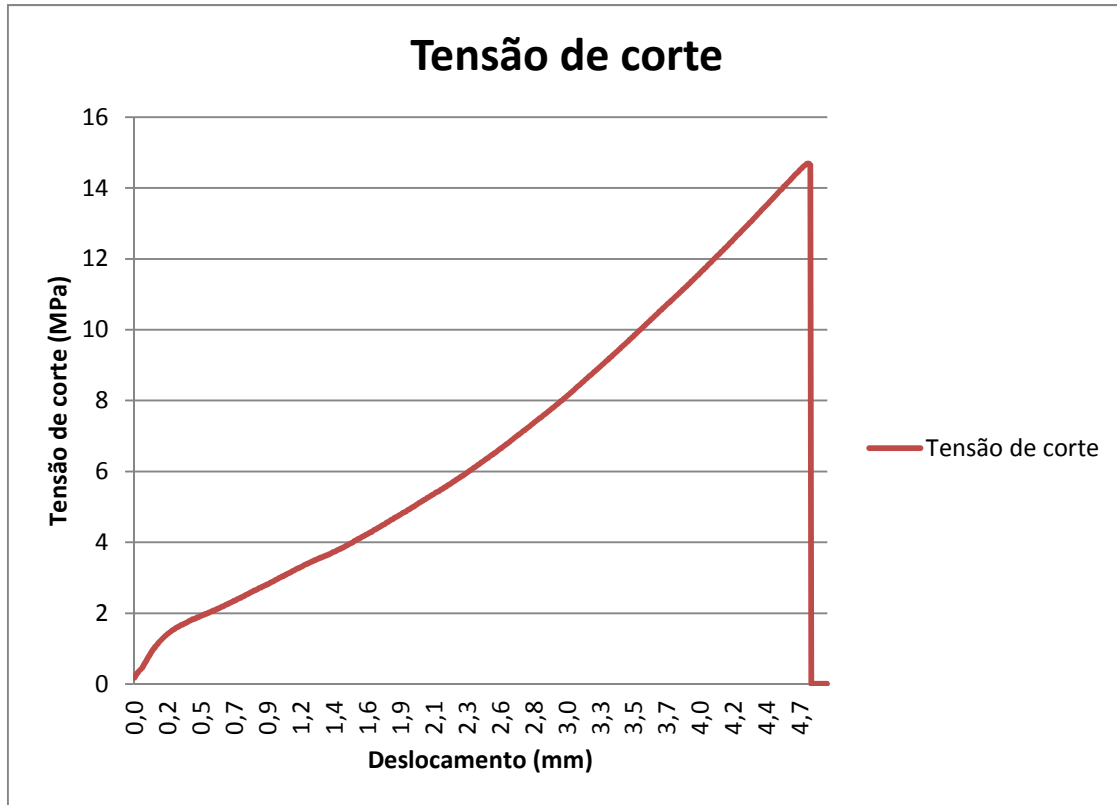
Provete 1:

Dados do provete	
Comprimento de sobreposição (mm)	18
Largura de sobreposição (mm)	22,5
Força máxima Aplicada (N)	5097,80
Tensão de corte Máxima (MPa)	12,59



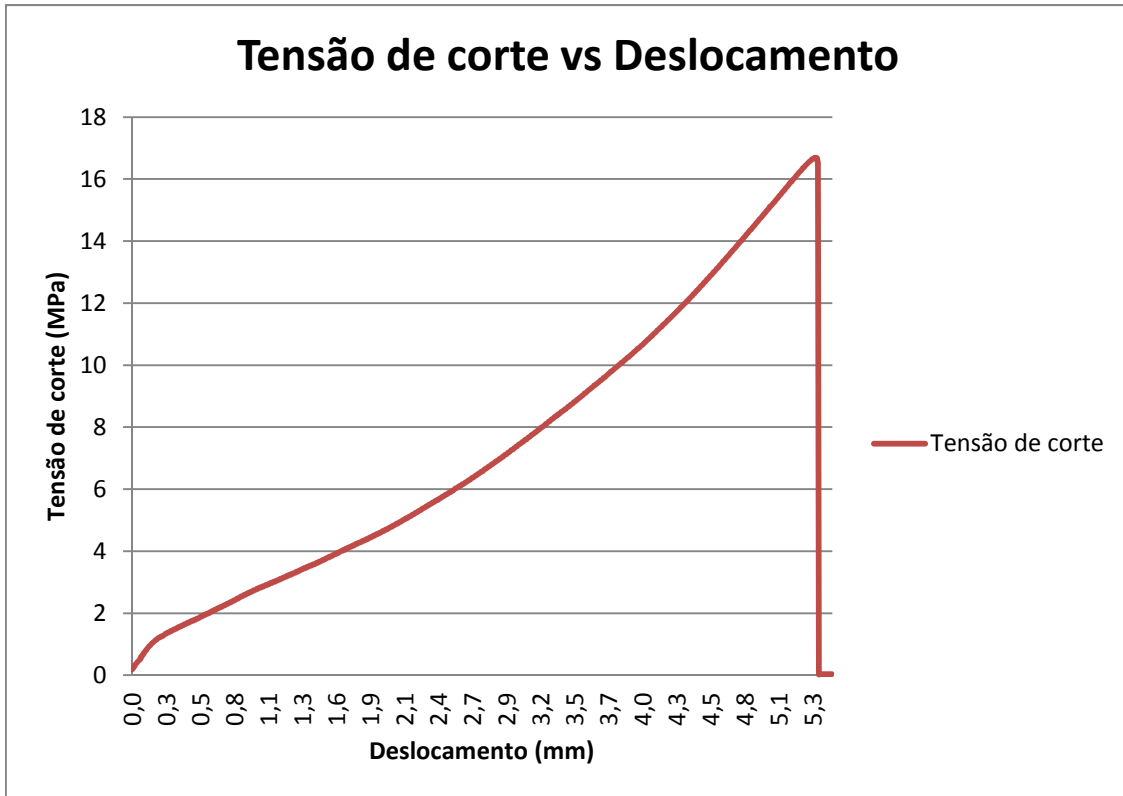
Provete 2:

Dados do provete	
Comprimento de sobreposição (mm)	16,4
Largura de sobreposição (mm)	22,5
Força máxima Aplicada (N)	5419,83
Tensão de corte Máxima (MPa)	14,69



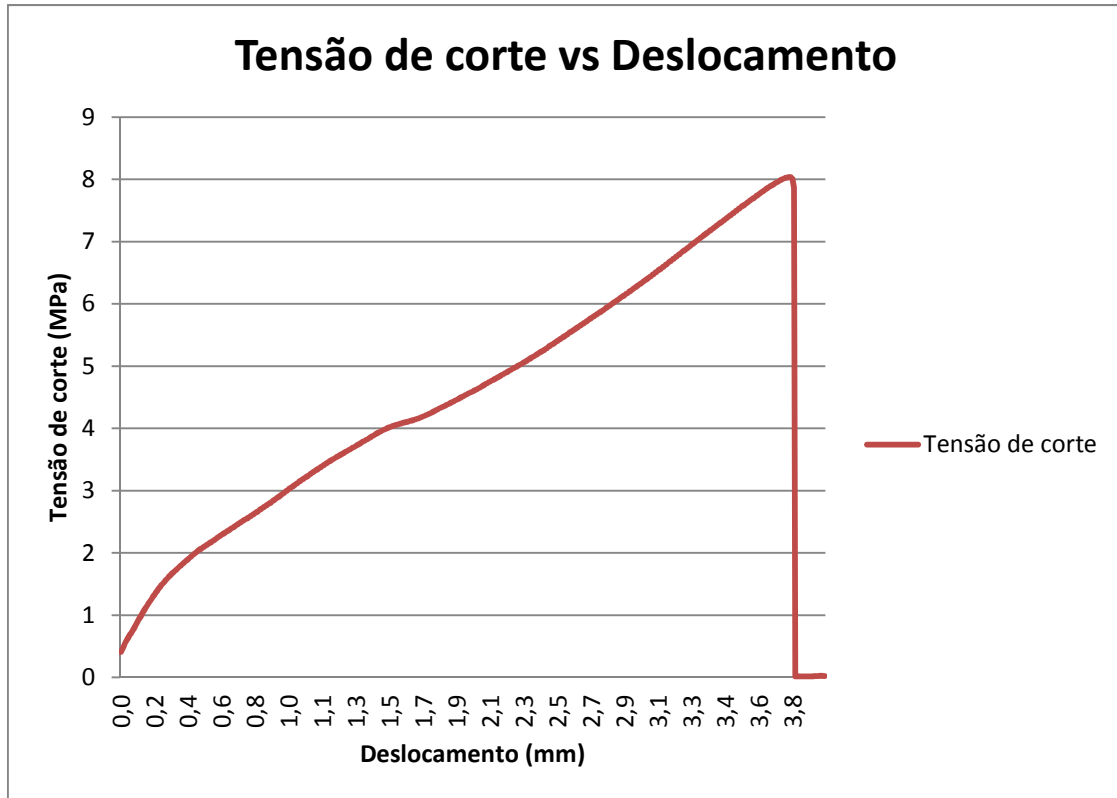
**Provete 3:**

Dados do provete	
Comprimento de sobreposição (mm)	16,8
Largura de sobreposição (mm)	22,5
Força máxima Aplicada (N)	6308,60
Tensão de corte Máxima (MPa)	16,69



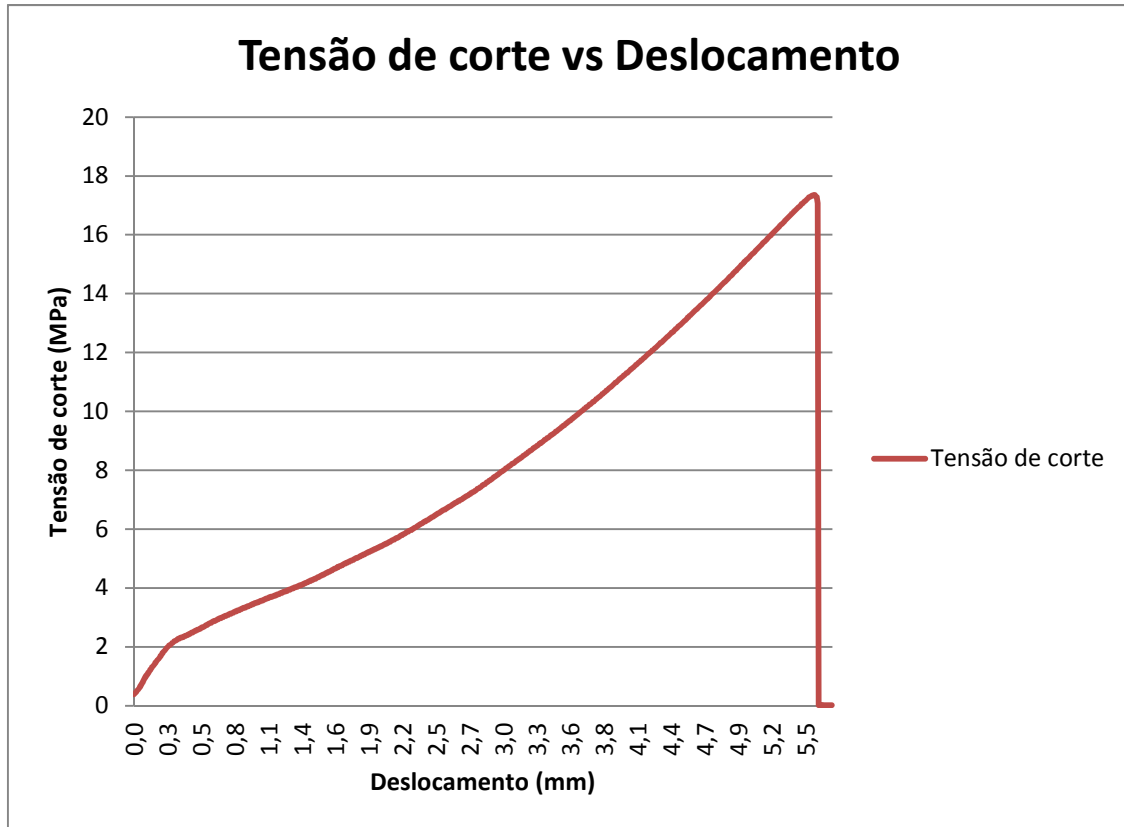
Provete 4:

Dados do provete	
Comprimento de sobreposição (mm)	17,3
Largura de sobreposição (mm)	22,7
Força máxima Aplicada (N)	3156,27
Tensão de corte Máxima (MPa)	8,04



Provete 5:

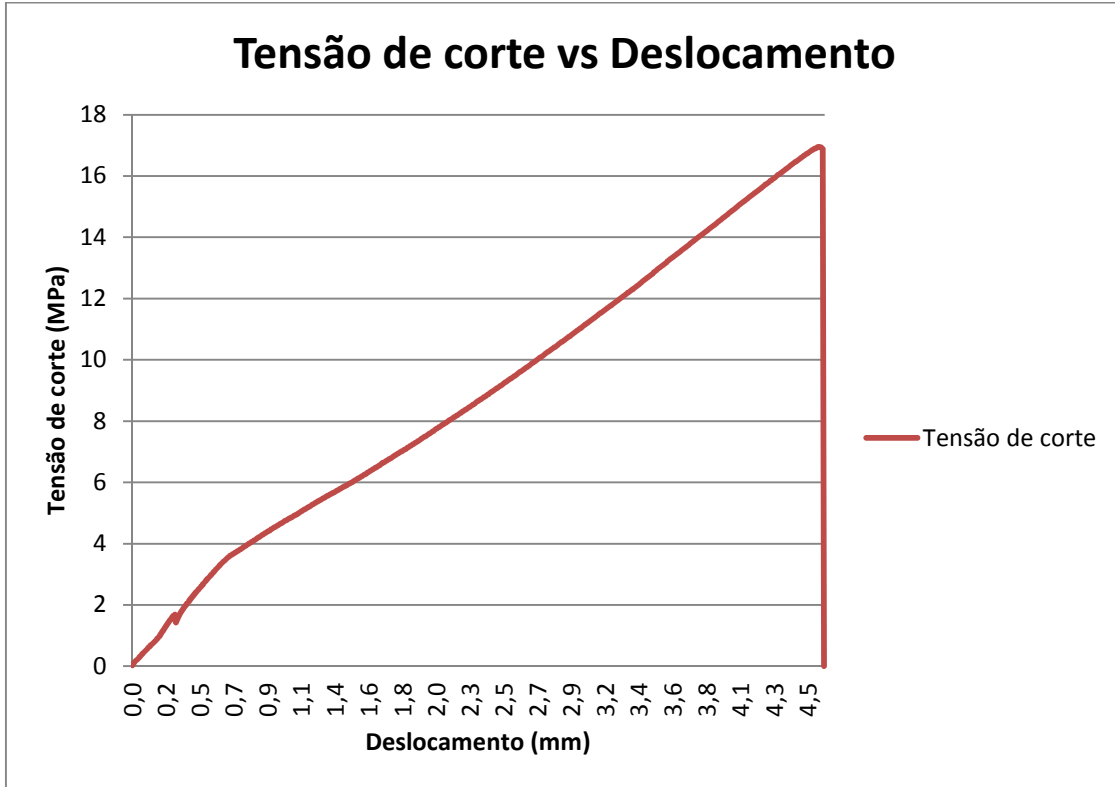
Dados do provete	
Comprimento de sobreposição (mm)	17,6
Largura de sobreposição (mm)	22,6
Força máxima Aplicada (N)	6900,53
Tensão de corte Máxima (MPa)	17,35



8 min @ 590 K

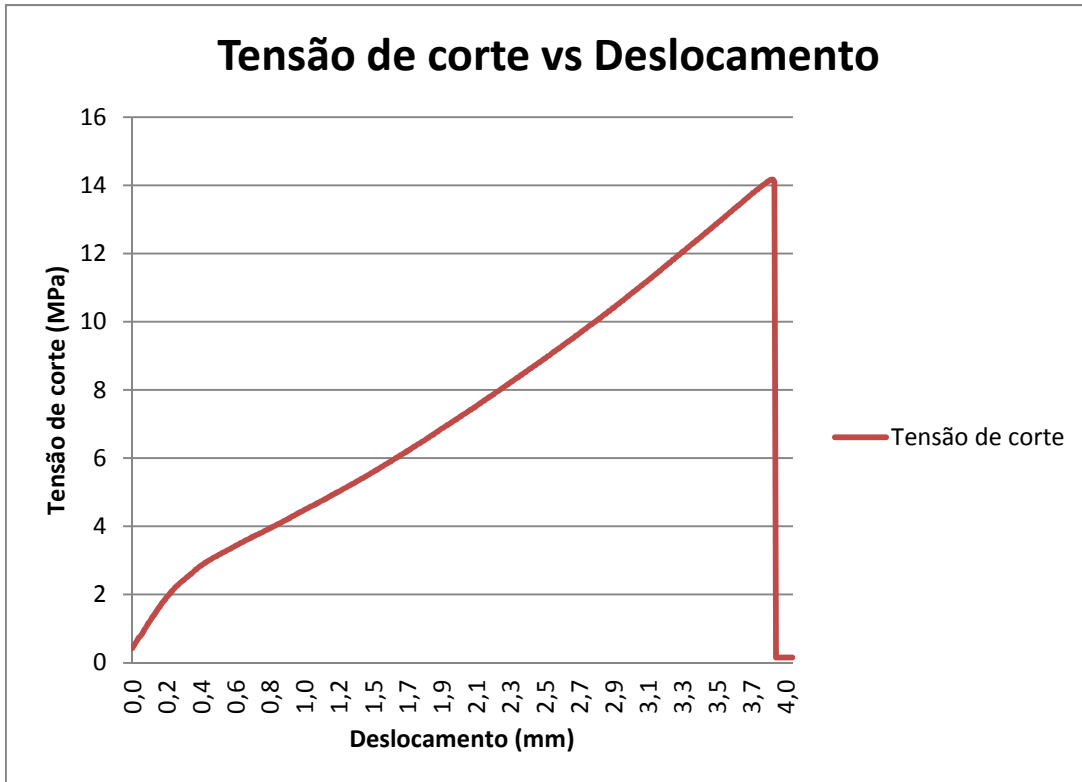
Provete 1:

Dados do provete	
Comprimento de sobreposição (mm)	16,8
Largura de sobreposição (mm)	19,5
Força máxima Aplicada (N)	5554,18
Tensão de corte Máxima (MPa)	16,95



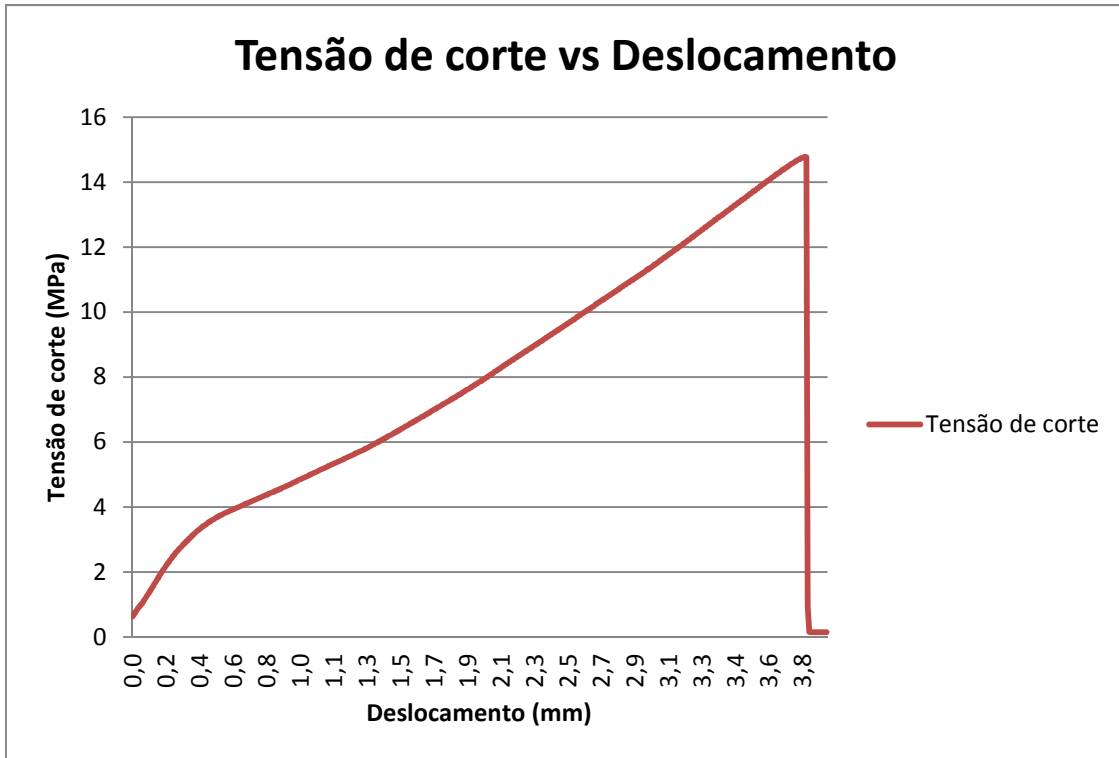
**Provete 2:**

Dados do provete	
Comprimento de sobreposição (mm)	19,4
Largura de sobreposição (mm)	15,6
Força máxima Aplicada (N)	4287,86
Tensão de corte Máxima (MPa)	14,17



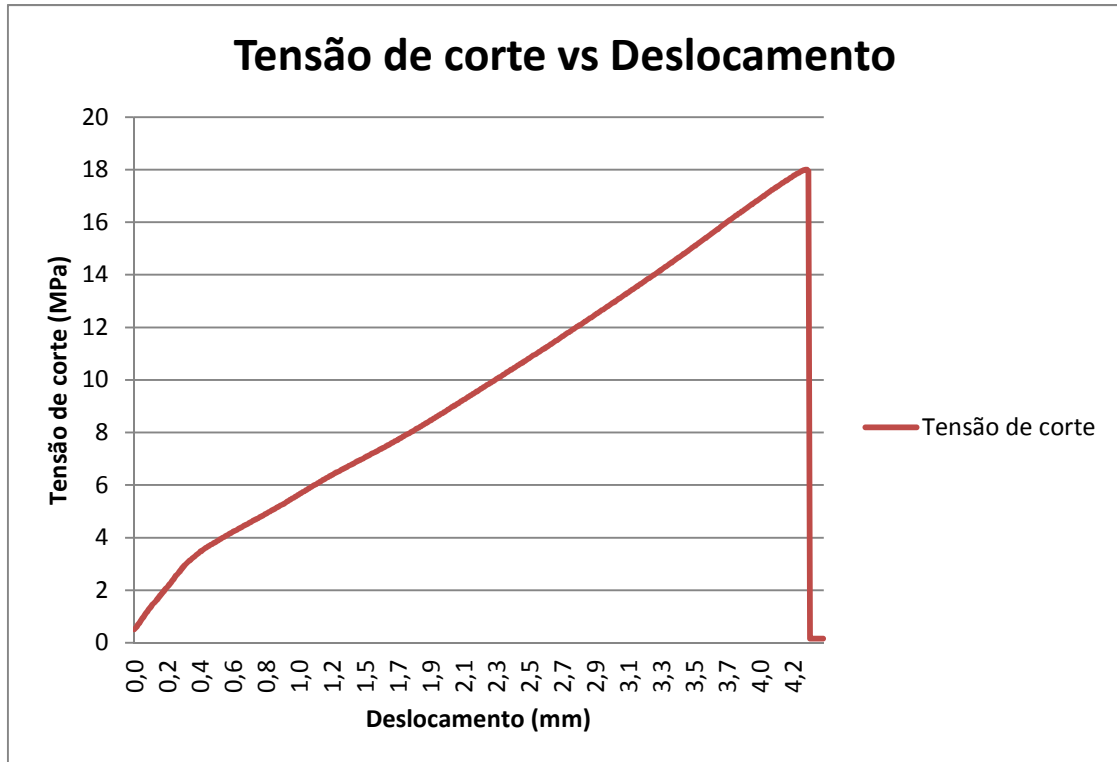
**Provete 3:**

Dados do provete	
Comprimento de sobreposição (mm)	18,8
Largura de sobreposição (mm)	16,1
Força máxima Aplicada (N)	4472,54
Tensão de corte Máxima (MPa)	14,78



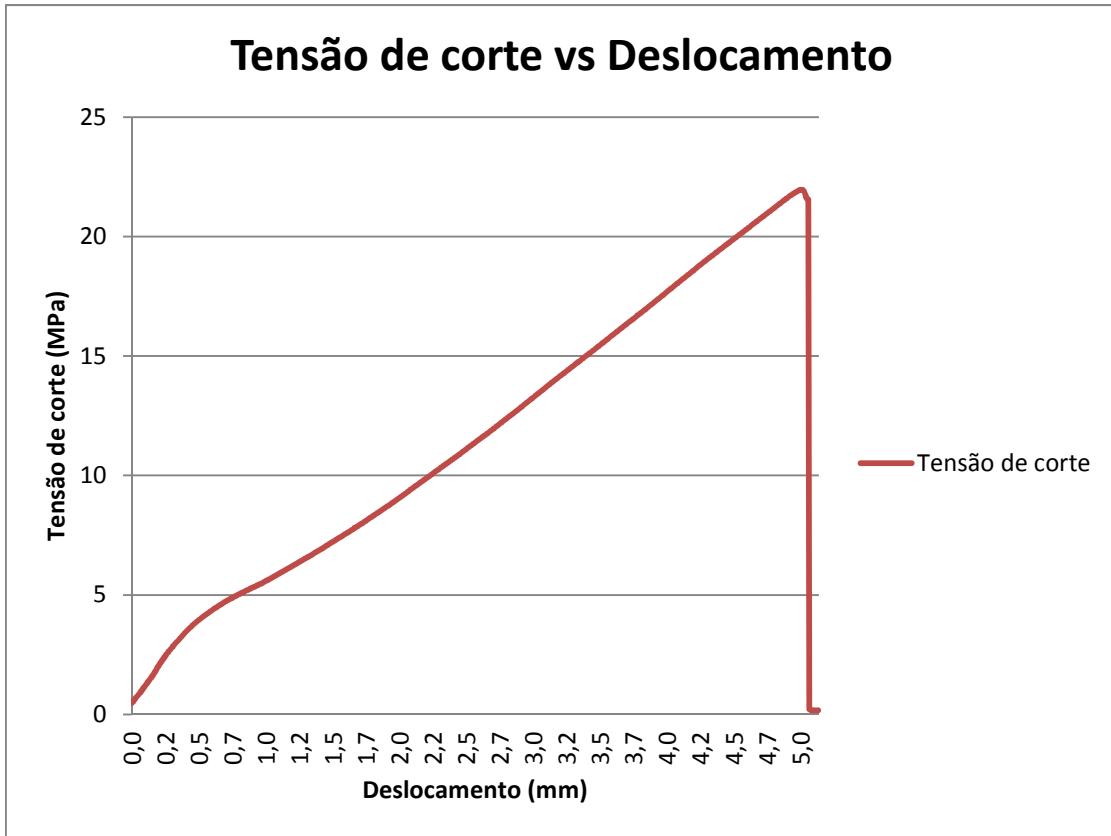
**Provete 4:**

Dados do provete	
Comprimento de sobreposição (mm)	18,3
Largura de sobreposição (mm)	16,5
Força máxima Aplicada (N)	5433,45
Tensão de corte Máxima (MPa)	17,99



Provete 5:

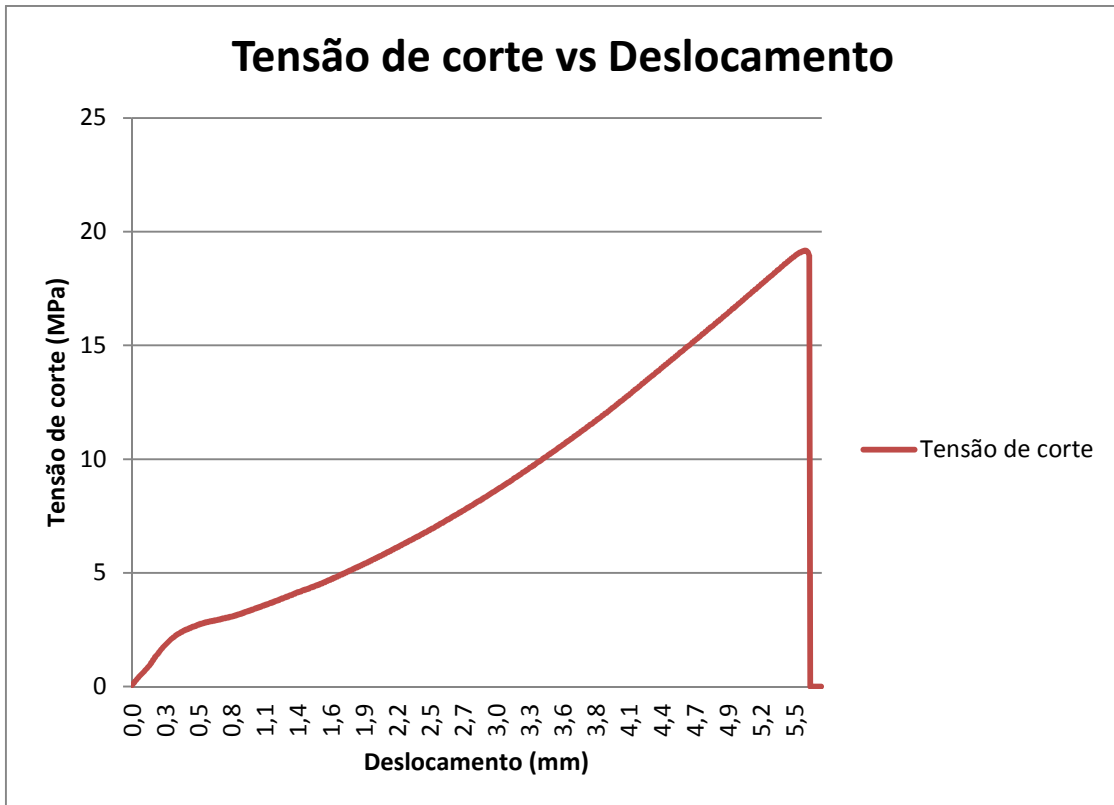
Dados do provete	
Comprimento de sobreposição (mm)	16,6
Largura de sobreposição (mm)	16,1
Força máxima Aplicada (N)	5871,39
Tensão de corte Máxima (MPa)	21,96



9 min @ 590 K

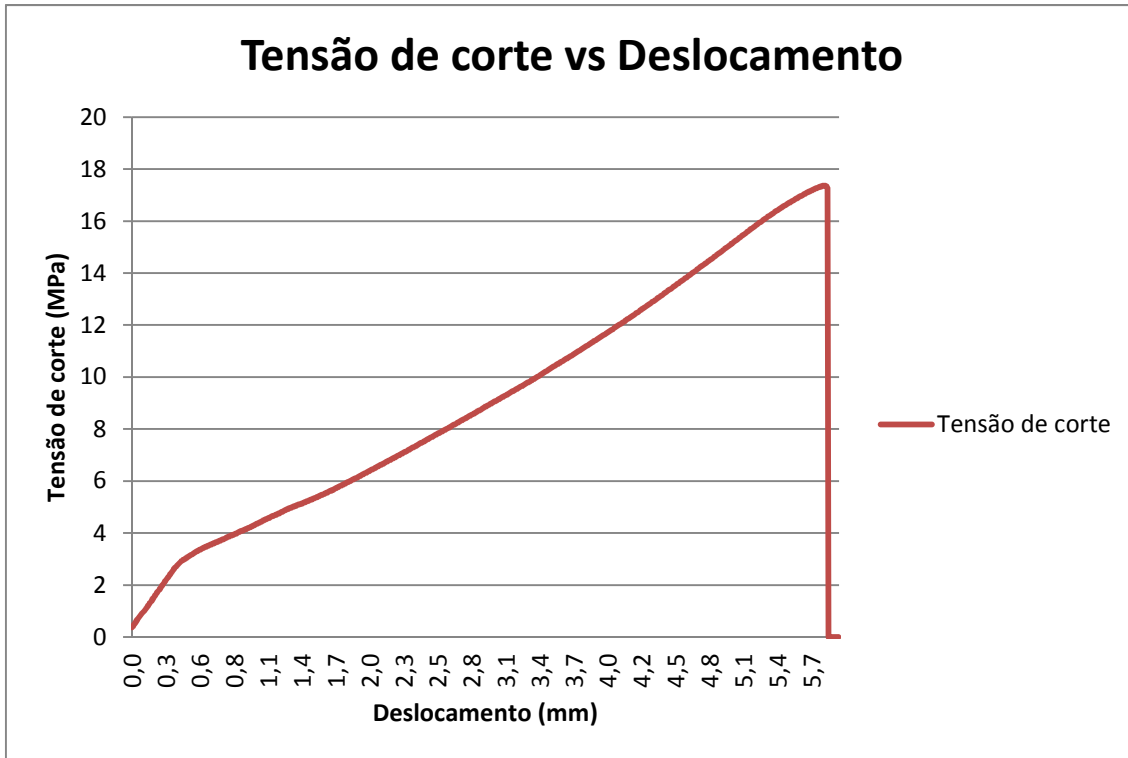
Provete 1:

Dados do provete	
Comprimento de sobreposição (mm)	16,6
Largura de sobreposição (mm)	16,1
Força máxima Aplicada (N)	5871,39
Tensão de corte Máxima (MPa)	21,96



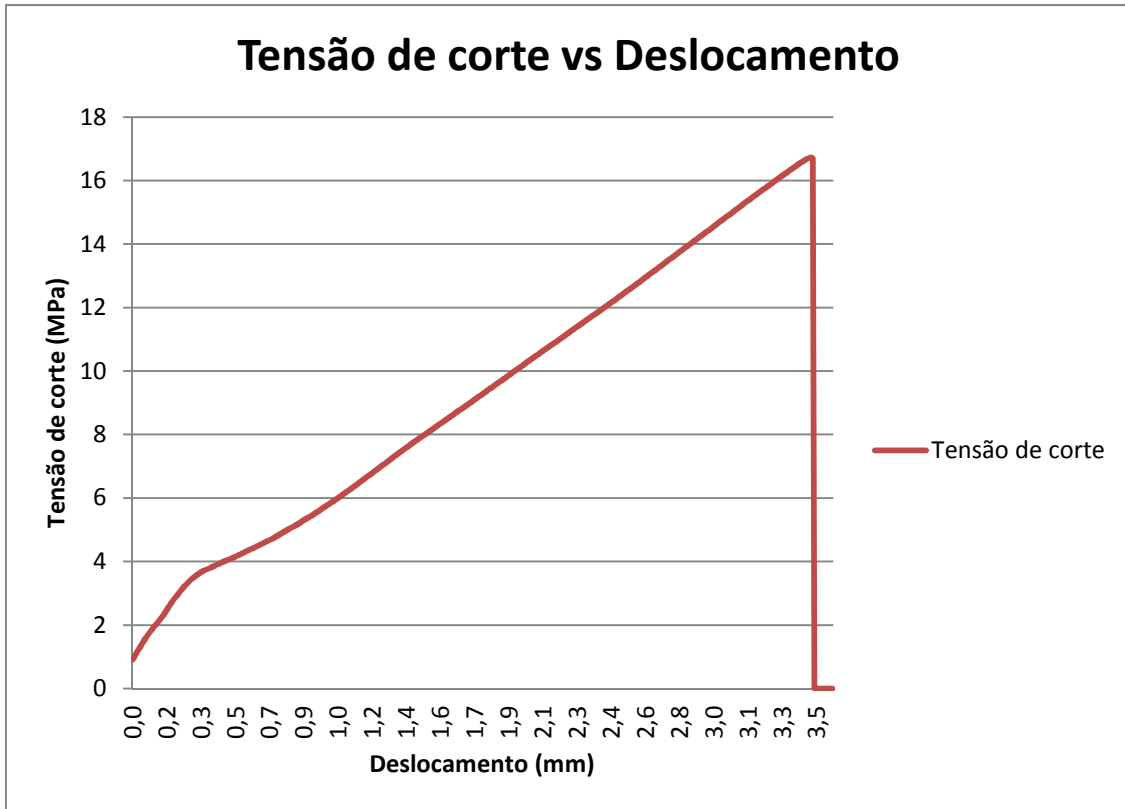
**Provete 2:**

Dados do provete	
Comprimento de sobreposição (mm)	21,9
Largura de sobreposição (mm)	16,9
Força máxima Aplicada (N)	6427,73
Tensão de corte Máxima (MPa)	17,37



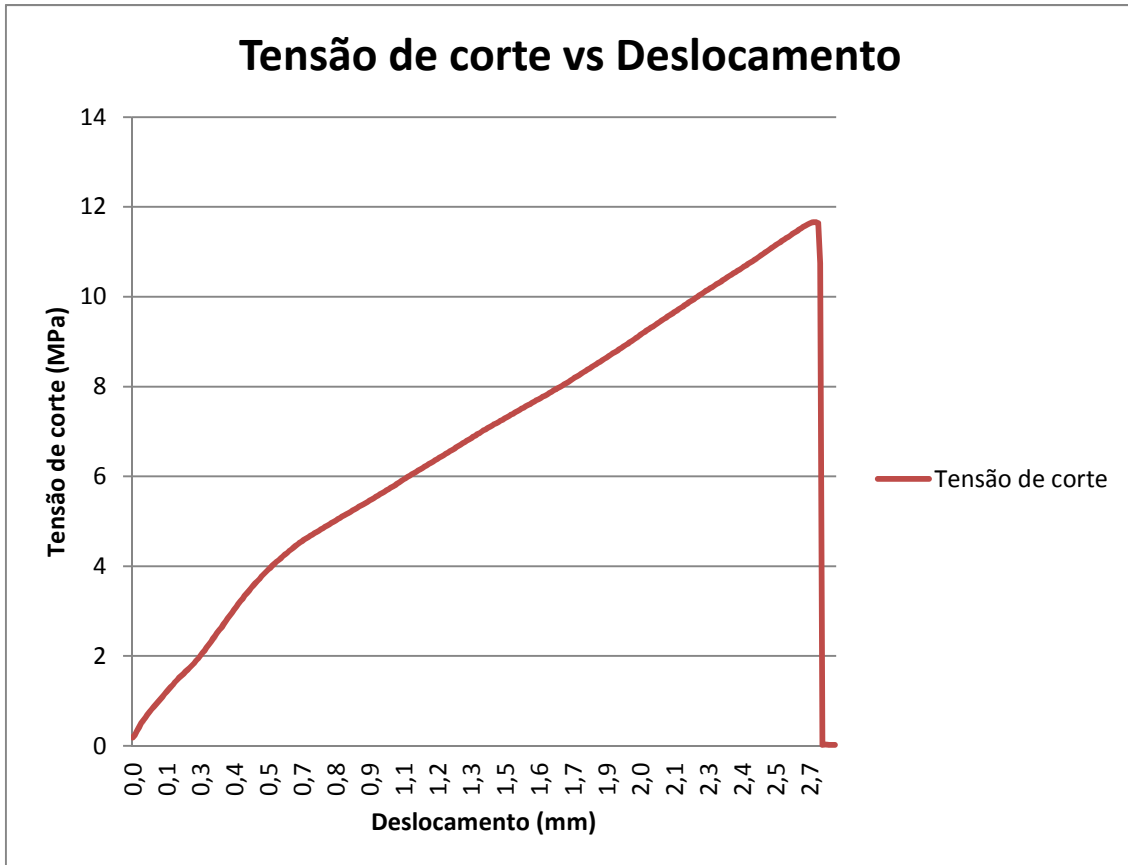
**Provete 3:**

Dados do provete	
Comprimento de sobreposição (mm)	20,6
Largura de sobreposição (mm)	16
Força máxima Aplicada (N)	5511,52
Tensão de corte Máxima (MPa)	16,72



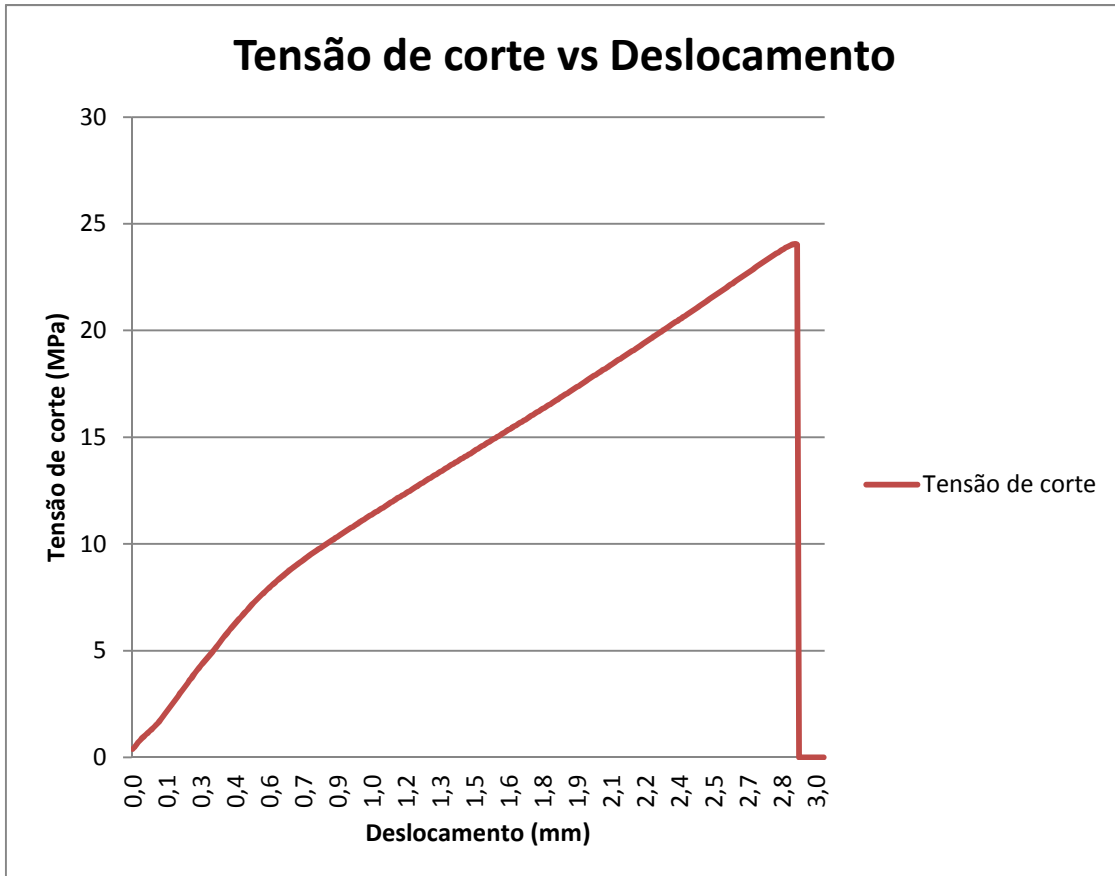
Provete 4:

Dados do provete	
Comprimento de sobreposição (mm)	20,5
Largura de sobreposição (mm)	16,1
Força máxima Aplicada (N)	3824,38
Tensão de corte Máxima (MPa)	11,66



**Provete 5:**

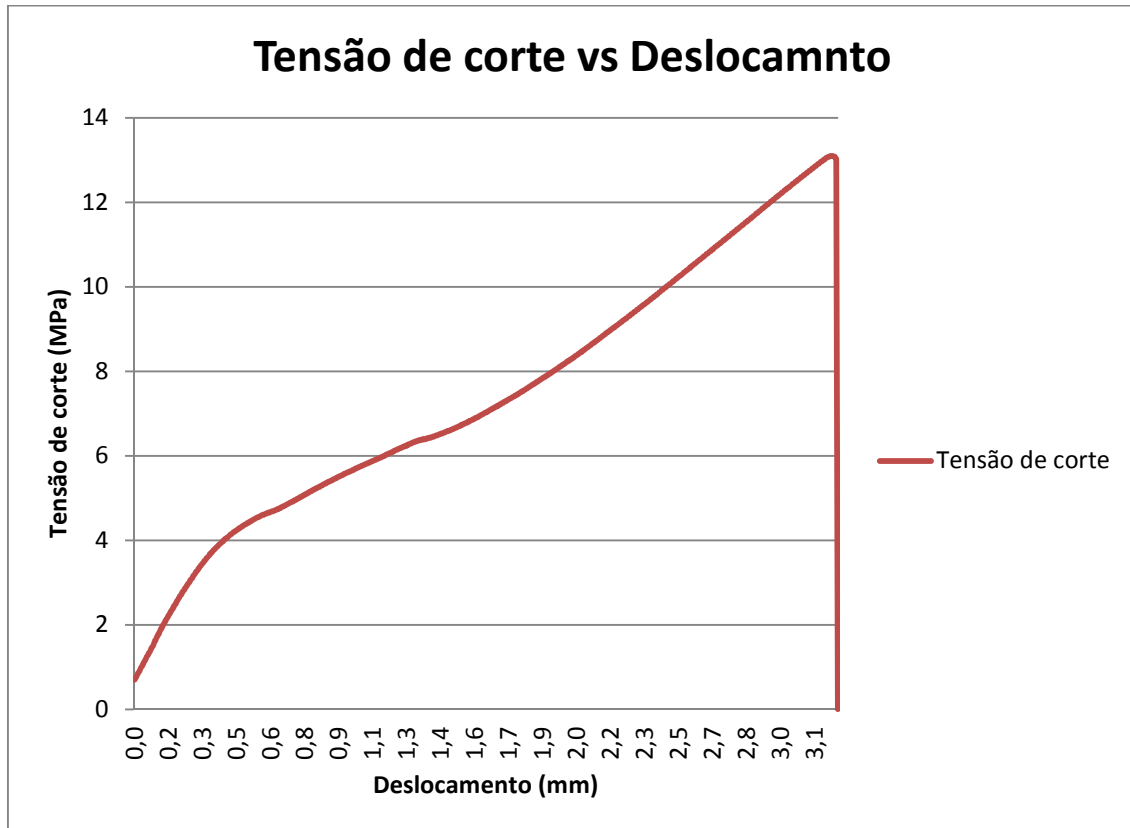
<b>Dados do provete</b>	
<b>Comprimento de sobreposição (mm)</b>	18,4
<b>Largura de sobreposição (mm)</b>	10,7
<b>Força máxima Aplicada (N)</b>	4727,65
<b>Tensão de corte Máxima (MPa)</b>	24,05



10 min @ 590 K

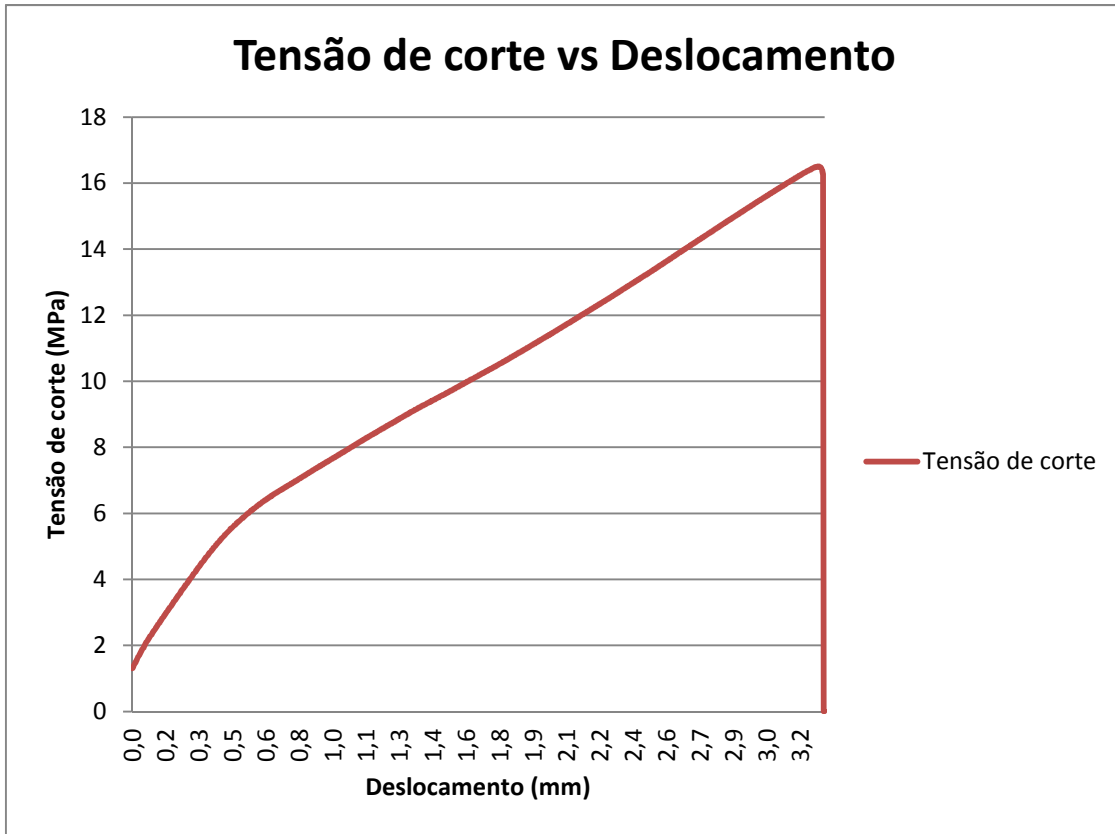
Provete 1:

Dados do provete	
Comprimento de sobreposição (mm)	22,5
Largura de sobreposição (mm)	16,1
Força máxima Aplicada (N)	4744,45
Tensão de corte Máxima (MPa)	13,10



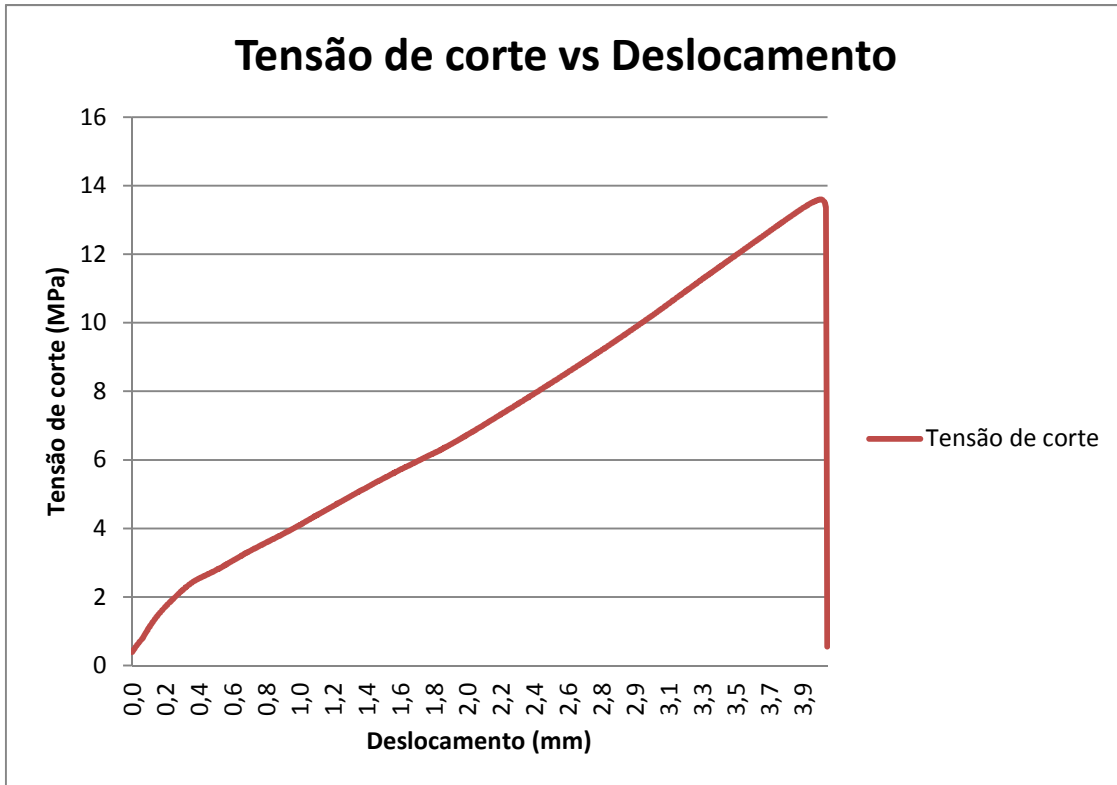
**Provete 2:**

<b>Dados do provete</b>	
<b>Comprimento de sobreposição (mm)</b>	22,5
<b>Largura de sobreposição (mm)</b>	16,1
<b>Força máxima Aplicada (N)</b>	5977,01
<b>Tensão de corte Máxima (MPa)</b>	16,50



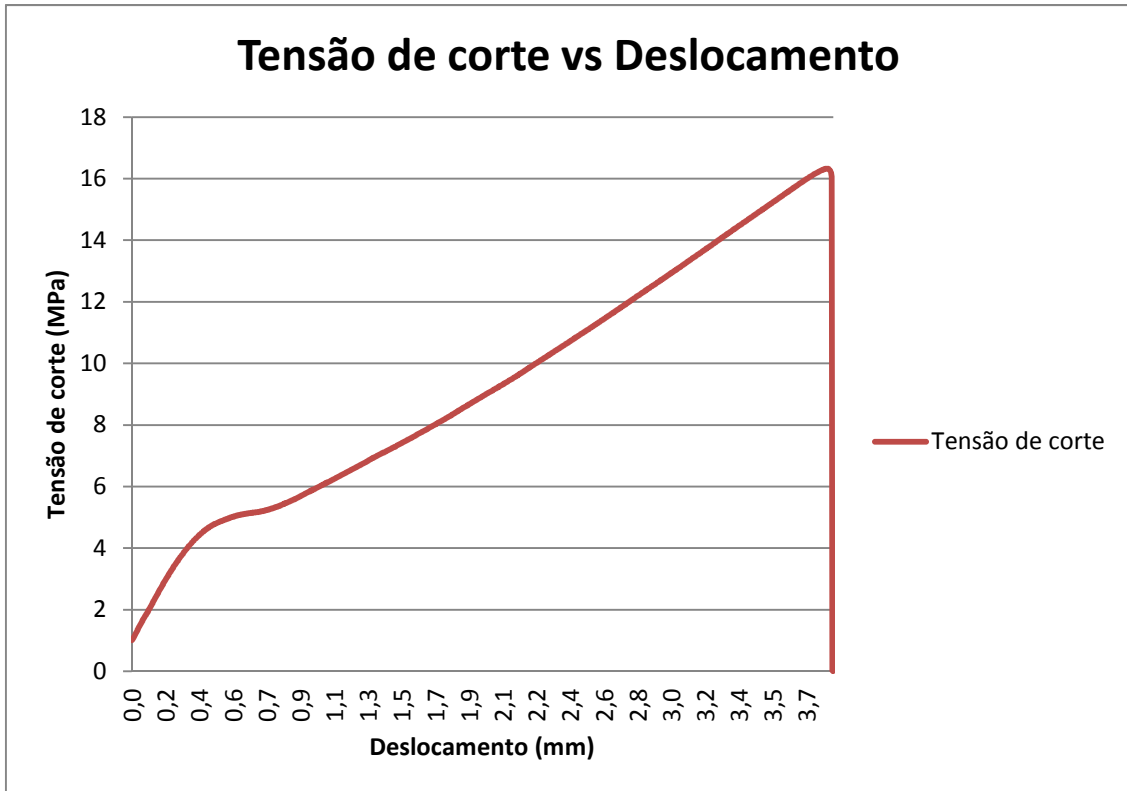
**Provete 3:**

<b>Dados do provete</b>	
<b>Comprimento de sobreposição (mm)</b>	22,4
<b>Largura de sobreposição (mm)</b>	17,5
<b>Força máxima Aplicada (N)</b>	5329,51
<b>Tensão de corte Máxima (MPa)</b>	13,60



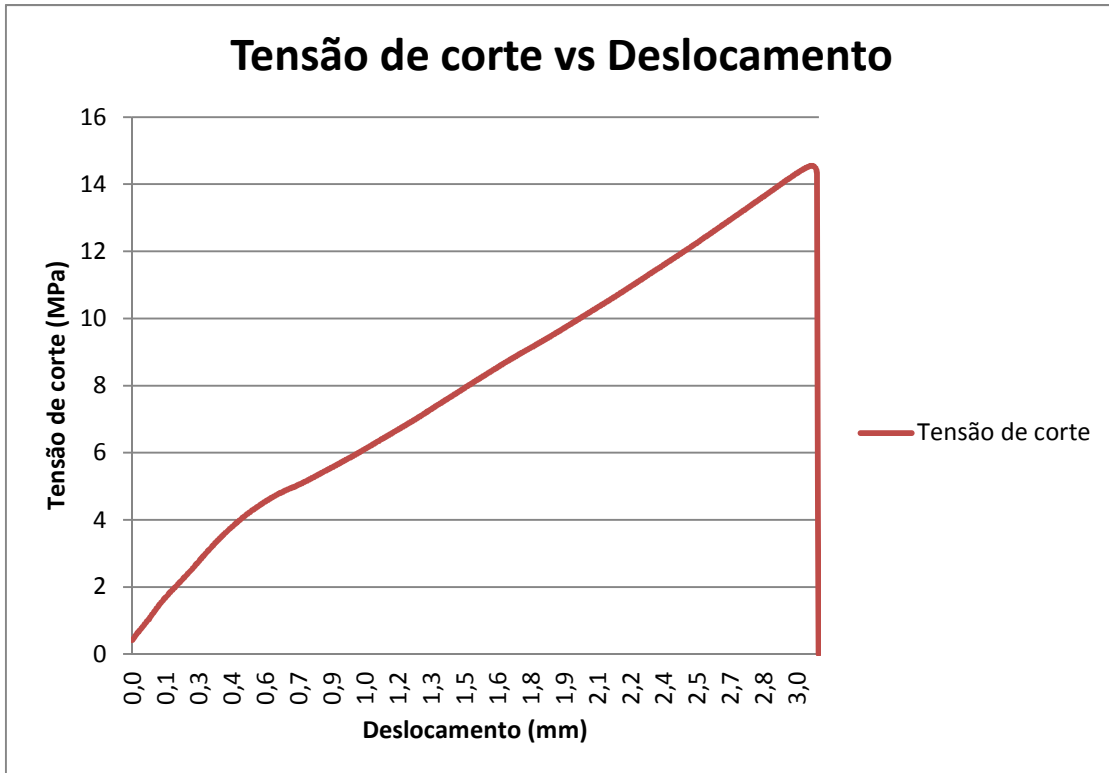
**Provete 4:**

Dados do provete	
Comprimento de sobreposição (mm)	22,5
Largura de sobreposição (mm)	16,5
Força máxima Aplicada (N)	6059,82
Tensão de corte Máxima (MPa)	16,32



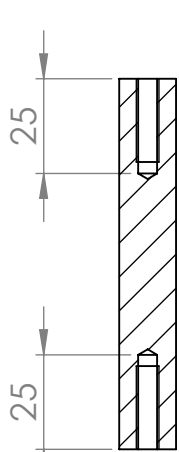
Provete 5:

Dados do provete	
Comprimento de sobreposição (mm)	22,5
Largura de sobreposição (mm)	15,3
Força máxima Aplicada (N)	5007,87
Tensão de corte Máxima (MPa)	14,55

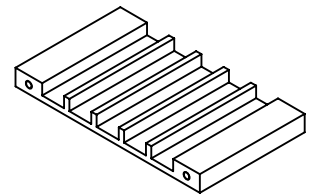
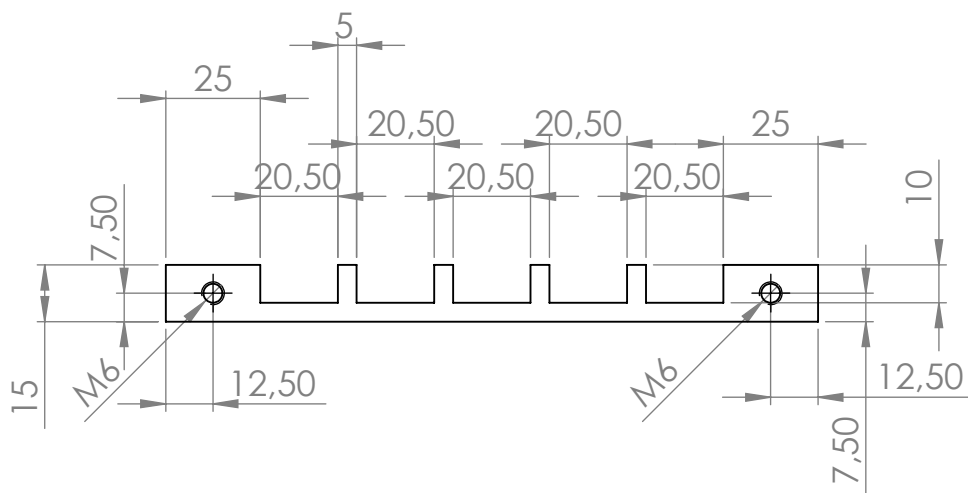
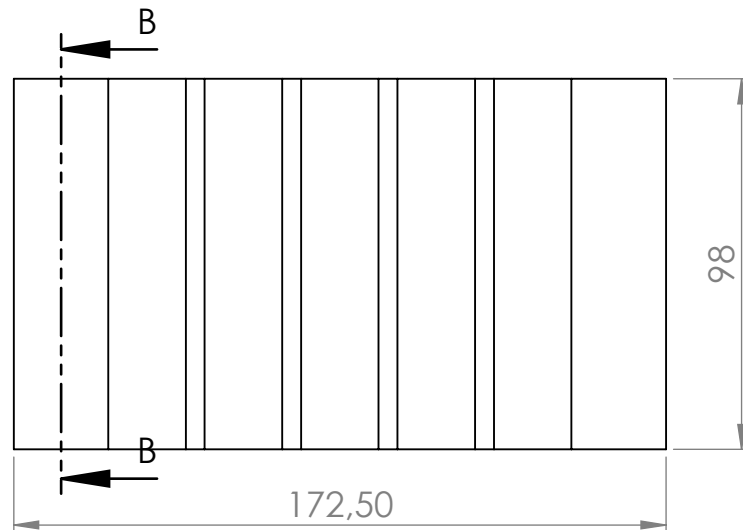


ANEXO III -





SECTION B-B  
SCALE 1 : 2



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:  
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS  
SURFACE FINISH:  
TOLERANCES:  
LINEAR:  
ANGULAR:

FINISH:

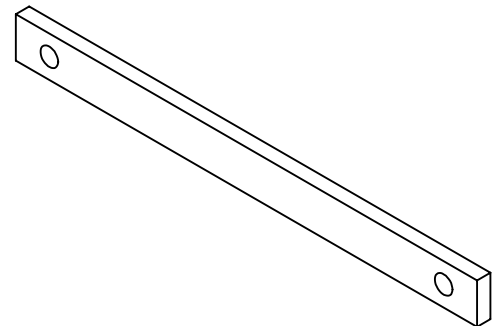
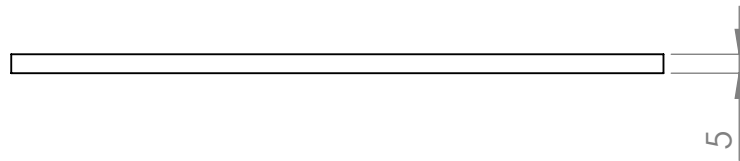
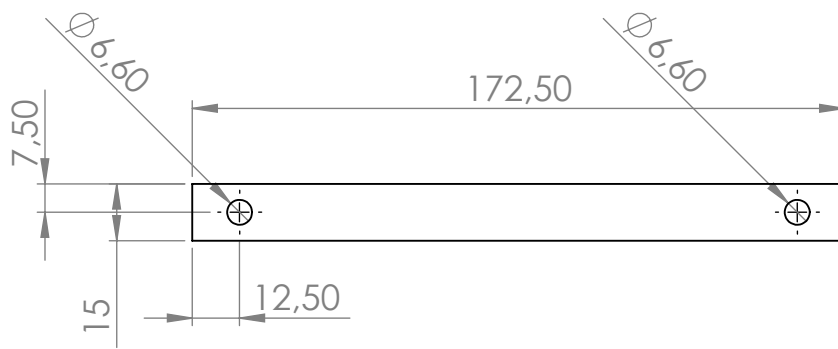
DEBUR AND  
BREAK SHARP  
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

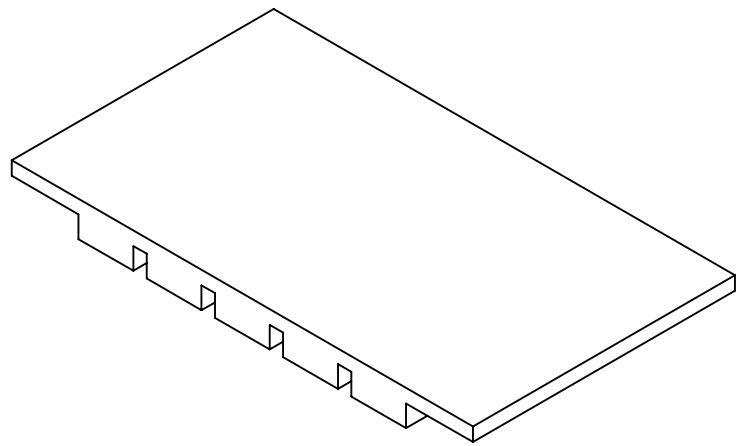
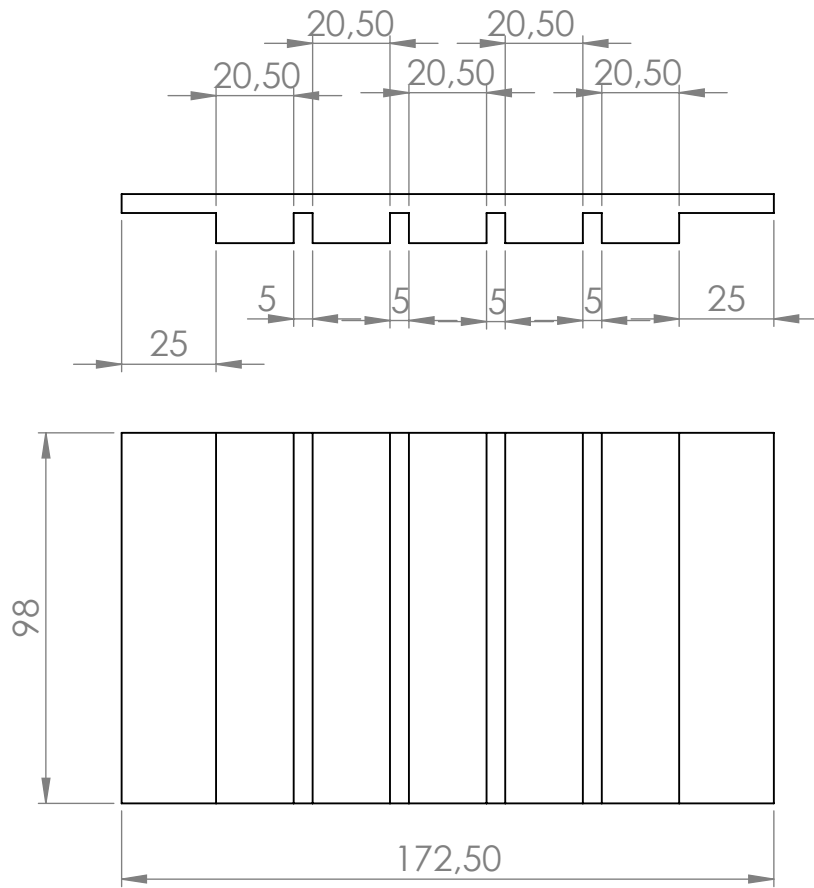
REVISION

NAME	SIGNATURE	DATE			
DRAWN					
CHK'D					
APPV'D					
MFG					
Q.A					
			MATERIAL:		
			WEIGHT:		

TITLE:		DWG. NO.		A4	
		placa base			
		SCALE:1:5		SHEET 1 OF 1	



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DRAWN		SIGNATURE		DATE		TITLE:			
CHK'D									
APPV'D									
MFG									
Q.A				MATERIAL:		DWG NO.		placa lateral	
						SCALE:1:2		A4	
				WEIGHT:		SHEET 1 OF 1			



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:  
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS  
SURFACE FINISH:  
TOLERANCES:  
LINEAR:  
ANGULAR:

FINISH:

DEBUR AND  
BREAK SHARP  
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE		
DRAWN					
CHK'D					
APPV'D					
MFG					
Q.A				MATERIAL:	
				WEIGHT:	

TITLE:	
DWG NO.	placa superior
SCALE:1:5	A4
SHEET 1 OF 1	