

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO
SUCKOW DA FONSECA**

**Análise da aplicação de adesivos para transmissão de
torque**

Antônio Vinícius Pereira Rodrigues

Davi de Almeida Lyra Corrêa

Renan Couto Beltrão

Prof. Orientador: Silvio Romero de Barros

Rio de Janeiro

Novembro 2014

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO
SUCKOW DA FONSECA**

Análise da aplicação de adesivos para transmissão de torque

Antônio Vinícius Pereira Rodrigues

Davi de Almeida Lyra Corrêa

Renan Couto Beltrão

Projeto Final apresentado em cumprimento às
normas do Departamento de Educação Superior
do CEFET/RJ, como parte dos requisitos para obtenção
do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Prof. Orientador: Silvio Romero de Barros

Rio de Janeiro

Novembro 2014

RESUMO

A união mecânica, que consiste na junção e/ou articulação de elementos mecânicos, é uma prática comum à Engenharia. Um dos grandes desafios para a Engenharia Mecânica é a busca pela associação de eficiência e durabilidade no desenvolvimento de meios que permitam tal união. Os avanços tecnológicos propiciaram a fabricação destes meios, que possibilitaram que, elementos de fixação mais comuns, como chavetas e pinos, pudessem permear a seleção de peças propensas à junção/articulação de dispositivos mecânicos.

A proposta deste projeto é estudar a viabilização do uso de adesivos em detrimento dos elementos fixadores comuns. Inicialmente, foram selecionados possíveis adesivos que atenderiam a solicitação de elevados esforços cisalhantes tangenciais em uma junta colada, considerando assim suas vantagens e desvantagens. Durante a etapa de análise foram calculadas a resistência à fadiga, resistência ao torque, além de uma análise econômica. Posteriormente, projetou-se um dispositivo para simulação experimental.

Após os estudos e realização dos testes conclui-se que os adesivos podem ser aplicados em juntas para transmissão de torque. O Loctite 422, dos adesivos selecionados para os testes, foi o que apresentou melhor resultado e estabilidade, mantendo força resistente próxima à máxima de ruptura, mesmo após sua ruptura.

Palavras chave: Chaveta, Eixo, Adesivos, Transmissão de Torque.

ABSTRACT

The mechanical union, which represents the junction and / or articulation of mechanical elements, is a common practice to Engineering. A major challenge for Mechanical Engineering, is the search for association of efficiency and durability in the development of ways to enable such union. Technological advances have enabled the fabrication of these means, which enabled most common attachment elements, such as cotters and pins, could permeate the selection of parts, subjected to the junction / articulation of mechanical devices.

The purpose of this project is to study the feasibility of using adhesives instead of common fixing elements. Initially, were selected adhesives that possibly would attend the request of high shear tangential efforts on a glued joint as well considering their advantages and disadvantages. During the analysis stage, were calculated fatigue resistance, resistance to torque, and an economic analysis. Subsequently, were designed a device for experimental simulation.

After studying and testing, it is concluded that the adhesives can be applied in joints for torque transmission. The Loctite 422, among those adhesives selected for testing, showed the best result and stability, while maintaining close to maximum breaking resistant force, even after its rupture.

Key words: Cotter, Shaft, Adhesives, Torque Transmission.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu pai e minha mãe por todo apoio e incentivo ao longo de toda minha vida, sem eles não seria possível alcançar essa conquista. Obrigado por toda cobrança e paciência, tudo foi muito importante para que hoje eu tenha me tornado o homem que sou. Mãe, parabéns pela guerreira que você é, sua doença só veio para nos fortalecer e unir mais, além de mostrar que devemos aproveitar mais e melhor a vida de hoje em diante. Pai, você é meu exemplo de homem na vida.

Agradeço a minha vó, que sempre me ajudou em tudo, sendo uma segunda mãe pra mim, e ao meu avô que não está mais presente entre nós, mas que tenho certeza que está feliz com esse momento.

Comemoro também com minha namorada que, principalmente nos últimos meses de faculdade, me apoiou, cobrou e tranquilizou nos momentos difíceis. Você é muito importante pra mim. Obrigado.

O apoio de todos os colegas de faculdade também foi fundamental na trajetória da graduação. Desejo a todos uma carreira de sucesso.

Agradeço, por fim, a instituição do CEFET/RJ e ao orientador Silvio por toda paciência e apoio. Aos demais professores que colaboraram para tal formação, o meu muito obrigado.

Antônio Vinícius Pereira Rodrigues

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Jorge Corrêa e Anilza Corrêa, por não medirem esforços para que esta etapa da minha vida como aluno de graduação fosse menos tortuosa possível, por todo apoio que me deram e a paciência e compreensão que tiveram ao longo de toda a faculdade, e principalmente durante a execução deste trabalho, entendo minhas ausências em alguns compromissos familiares, que deixei de ir justamente por priorizar minha formação, e finalmente posso retribuir esse suporte com a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Agradeço aos meus companheiros de grupo Renan Beltrão e Antônio Vinícius, pelo espírito de equipe e companheirismo que viabilizaram a realização deste projeto, e pela confiança em mim depositada.

À minha namorada, Carmine Montico, por ser o maior motivo que me faz seguir em frente, sempre disposta a ajudar com palavras de carinho e incentivo, trazendo um pouco de paz em meio a todo o stress que envolve a entrega de um projeto como esse. Você é minha maior inspiração para tudo nessa vida.

Agradeço aos mestres Silvio de Barros, que nos orientou brilhantemente neste trabalho, compartilhando seu conhecimento, e ao Paulo Kenedi, sempre solícito a sanar dúvidas, não só para cumprimento deste projeto, mas ao longo de todo curso de engenharia mecânica.

Também agradeço à Associação Atlética Acadêmica do CEFET/RJ, a todos os seus membros e sócios, associação da qual tive o imenso prazer de fazer parte e lutar dentro e fora de quadra por ela, o que fez aflorar um sentimento pela faculdade que foi de vital importância para sempre buscar o objetivo maior, não importa quantos obstáculos no percurso, acreditar sempre que dará tudo certo.

Davi A. L. Corrêa

AGRADECIMENTOS

Tenho por agradecer em especial por todo apoio ao longo de minha vida a meu pai Sergio Fonseca Beltrão e minha mãe Sandra Regina Campos do Couto Beltrão. O resultado de todo esse suporte foi mais essa conquista, de poder estar concluindo um curso de graduação em uma instituição de ensino de excelência, como é o CEFET/RJ.

Agradeço também a empresa TEADIT, que apoiou o projeto e viabilizou que este estudo fosse elaborado com êxito.

Agradeço também ao meu irmão e amigos que me deram forças e me incentivou a seguir esta jornada.

Renan Couto Beltrão

SUMÁRIO

Capítulo 1 - Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Justificativa	2
1.3 Objetivo.....	2
1.4 Metodologia e Trabalho Realizado	2
1.5 Organização	3
Capítulo 2 – Eixos de transmissão	4
2.1 Cargas em eixos	4
2.2 Conexões e concentração de tensões	5
2.3 Cargas de Fadiga.....	6
2.3.1 Sensibilidade ao entalhe.....	6
2.4 Elementos Fixadores de Eixos	7
2.4.1 Elementos de fixação móvel	8
2.5 Chavetas.....	10
2.5.1 Tolerâncias dimensionais para chavetas	11
2.5.2 Fabricação do rasgo da chaveta	11
2.5.3 Tipos de chavetas	12
2.5.4 Dimensionamento de chavetas.....	12
2.5.5 Fabricação / comercialização / padronização.....	14
Capítulo 3 – Colagem Estrutural	15
3.1 Introdução / História	15
3.2 Vantagens.....	16
3.3 Desvantagens	17
3.4 Conceitos Gerais	18
3.5 Classificação dos adesivos	20
3.5.1 Propriedade de cura.....	20
3.5.2 Composição Química.....	23
3.6 Propriedades químicas	23
3.6.1 Termostáveis elásticos / elastoméricos	23

3.6.2 Adesivos estruturais	24
3.6.3 Adesivos termoplásticos	25
Capítulo 4 – Estudo de adesivos para substituição de chavetas	27
4.1 Propriedades mecânicas do aço 1020.....	27
4.2 Análise comparativa da tensão de cisalhamento entre projeto com chaveta e projeto com junta colada	28
4.2.1 Cálculo da tensão de cisalhamento para ruptura da chaveta	28
4.2.2 Cálculo da área da junta colada.....	29
4.2.3 Cálculos da tensão de cisalhamento mínima do adesivo.....	29
4.2.4 Seleção do adesivo	30
4.3 Análise comparativa de fadiga em projeto com chaveta e em projeto com junta colada.....	34
4.3.1 Cálculo do limite de resistência à fadiga S_e	34
4.3.2 Cálculo de S_e para eixo com rasgo de chaveta	38
4.3.3 Cálculo de S_e para eixo sem rasgo.....	38
4.4 Análise comparativa econômica entre projeto com chaveta e projeto com junta colada.....	39
4.4.1 Análise econômica em montagens de manutenção corretiva.....	39
4.4.2 Análise econômica em montagens com confecção de elementos	41
Capítulo 5 – Análise Experimental	43
5.1 Objetivos	43
5.2 Planejamento.....	43
5.2.1 Pré-teste.....	44
5.3 Projeto do dispositivo	44
5.3.1 Número mínimo de parafusos no flange para resistir ao torque	46
5.3.2 Análise de tensão de flexão e torção no ponto crítico.....	46
5.3.3 Gabarito para cura da cola	47
5.4 Processo de colagem	48
5.5 Etapa de teste	48
5.6 Resultados	49
5.7 Trabalhos futuros	52
Capítulo 6 - Conclusão	53
Referências Bibliográficas.....	54
ANEXOS	55

ANEXO A: Loctite 422	56
ANEXO B: Loctite 660	57
ANEXO C: Araldite.....	58
ANEXO D: Instron 5966	59
ANEXO E: Desenhos do projeto do dispositivo.....	60

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fator de concentração de tensão K_t em função de uma barra plana (Robert L. Norton, 2013)	6
Figura 2: Fatores de sensibilidade ao entalhe para aços (Robert L. Norton, 2013)	7
Figura 3: Alguns métodos de fixação de eixos (Joseph E. Shigley, 2005)	8
Figura 4: Anéis de fixação (NEI)	9
Figura 5: Anéis de retenção (NEI)	10
Figura 6: Tipos de tolerâncias (Jack A. Collins, 2006)	11
Figura 7: Fabricação do rasgo de chaveta (Jack A. Collins, 2006)	11
Figura 8: Dimensionamento de chavetas (Jack A. Collins, 2006)	13
Figura 9: Tensões atuando na chaveta (Jack A. Collins, 2006)	13
Figura 10: Fenômeno da adesão e da coesão, em nível estrutural (Antônio G. de Magalhães, 2007)	19
Figura 11: Engrenagem aço 1020 utilizada em tear	27
Figura 12: Cisalhamento simples (Robert L. Norton, 2013)	28
Figura 13: LOCTITE 422 (Henkel)	31
Figura 14: Aplicação do LOCTITE 660 (Henkel)	32
Figura 15: Araldite Hobby (BRAFIX)	33
Figura 16: Máquina Instron 5966	44
Figura 17: Dispositivo posicionado na máquina	45
Figura 18: Ilustração do gabarito	47
Figura 19: Dispositivo posicionado para realização do teste	48
Figura 20: Gráfico resultante do teste da Loctite 422	50
Figura 21: Gráfico resultante do teste da Araldite Hobby	51
Figura 22: Gráfico resultante do teste da Loctite 660	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Desempenho mecânico dos tipos de adesivo (Antônio G. de Magalhães, 2007)	26
Tabela 2: Fatores a e b de acordo com o acabamento superficial (Norton, 2013).....	35
Tabela 3: Fator de confiabilidade (Norton, 2013)	36
Tabela 4: Valores de mercado para chavetas	40
Tabela 5: Valores de mercado para adesivos	40
Tabela 6: Custos de serviço para eixos chavetados	42
Tabela 7: Custo de serviço para colagem	42

Capítulo 1

Introdução

A globalização e o capitalismo propiciaram um sistema mercadológico competitivo, e desencadearam numa considerável limitação dos recursos naturais. O aumento da procura e a significativa redução da oferta destes recursos impulsionaram pesquisas pela descoberta de novos materiais, mais baratos e com uma maior gama de aplicação. Considerando-se que, em praticamente todos os equipamentos e mecanismos, existe a necessidade de se realizar a união de elementos, elementos estes que são de diferentes tipos de materiais, inclusive metálicos, o surgimento dos polímeros e dos plásticos forçou o desenvolvimento de novos métodos de união. O processo de colagem de juntas, hoje, é utilizado como solução na realização e união de polímeros com metais, assim como no processo de união entre metais de diferentes ligas, o que no passado era considerado inviável.

1.1 Motivação

A motivação para a escolha do tema surgiu a partir de um fato real, vivenciado no dia a dia de uma empresa do ramo farmacêutico, na qual uma esteira, que escoava toda a produção de remédios de uma determinada linha, parou de funcionar devido à quebra da chaveta que realizava a transmissão de torque do motor, movendo a esteira. Tal fato acarretou a suspensão das atividades industriais por cerca de quatro horas.

A vara da chaveta encontrava-se no almoxarifado, o que possibilitava a troca, entretanto, o almoxarifado da empresa localizava-se do lado de fora da área produtiva da fábrica, no setor de usinagem, fazendo com que o processo de corte da vara, transporte até o local da linha de produção, posicionamento e remontagem da chaveta demandassem muito tempo. Este trabalho, portanto, pretende propor a aplicação de adesivos como meio de substituição de elementos de fixação, evitando que situações como esta ocorram e prejudiquem a rotina das empresas e suas respectivas demandas.

1.2 Justificativa

Em um mercado tão competitivo como nos dias atuais exige uma rápida atuação e redução de custos em todos os setores assim como na manutenção. Caso o estudo da aplicação de adesivos seja comprovadamente efetivo seria possibilitada maior velocidade na montagem de elementos e redução de elementos de máquinas nos almoxarifados das fábricas.

Entendendo a necessidade de operacionalidade das empresas e compreendendo a máxima de Benjamin Franklin de que, tempo é dinheiro, buscamos uma alternativa para se reduzir o número de itens no estoque, além da redução do tempo de remontagem do sistema.

1.3 Objetivo

O objetivo do projeto é estudar a viabilidade da substituição de elementos de fixação pela aplicação de adesivos. Com isso, utilizar-se-á o processo de colagem para substituir as chavetas e outros elementos de fixação, que são concentradores de tensão por adesivos. É fundamental ressaltar a consequente redução do número de itens a se ter em estoque.

1.4 Metodologia e Trabalho Realizado

Para a execução da proposta de economia de recursos por meio da substituição dos materiais utilizados para a manutenção de sistemas mecânicos, planejou-se, na primeira etapa, a identificação dos tipos de fixações de eixos, encontrando suas vantagens, desvantagens e aplicabilidade. Após conhecer os elementos fixadores de eixos, era necessário entender o processo de composição e funcionamento de adesivos, assim como, suas vantagens e desvantagens, além da possibilidade de se confeccionar uma junta colada com elementos concêntricos.

O estudo sobre adesivos foi de extrema importância, pois, através dos conhecimentos adquiridos, foi possível apontar possíveis tipos de adesivos com altas resistências e sua possível desmontagem. Por conseguinte, calculou-se o dimensionamento "ótimo" para confecção da junta, além da identificação do adesivo mais indicado para determinadas situações. Intenciona-se

confeccionar um dispositivo para teste de resistência de cisalhamento para descobrir o torque máximo admitido pela junta colada.

1.5 Organização

O trabalho foi organizado em seis capítulos, sendo o primeiro deles apenas introdutório, no qual as considerações iniciais são apresentadas, seguido pelo objetivo do trabalho e pela metodologia de estudo utilizada. No segundo capítulo, encontra-se uma revisão sobre eixos, apresentando conceitos sobre cargas aplicadas e concentradores de tensão, além do dimensionamento das chavetas utilizadas nesses eixos e alguns dos principais elementos fixadores de eixos, com maior ênfase na descrição de chavetas, que será o elemento a ser substituído pelo adesivo.

A partir do terceiro capítulo apresenta-se o estudo que foi feito sobre colagem estrutural, o qual fala da sua origem na indústria, conceitos gerais, vantagens e desvantagens de uso, além de métodos de seleção do adesivo mais adequado para o projeto e a classificação dos adesivos quanto a sua propriedade de cura e composição química, mostrando os tipos de adesivos mais comuns. No quarto capítulo, é feito o estudo para a substituição de chavetas por adesivos, no qual são apresentados os cálculos para a correta seleção do adesivo, neste capítulo também se encontra uma análise comparativa econômica e de fadiga entre chavetas e adesivos.

O quinto capítulo apresenta a parte prática e mais relevante de todo projeto, nele foi realizada toda a análise experimental, mostrando o objetivo, planejamento, projeto do dispositivo, processo de colagem, máquina de teste, etapa e resultados. Por fim, é no sexto capítulo que o trabalho se encerra, abarcando as considerações finais, na qual a importância do trabalho é frisada, pois as soluções e a conclusão do trabalho são realizadas.

Capítulo 2

Eixos de transmissão

Os eixos de transmissão são aplicados em praticamente todas as partes das máquinas que transmitem movimento de rotação e torque entre diferentes posições. Em suma, um eixo transmite o torque do motor, seja ele elétrico ou de combustão interna. Em alguns casos, os eixos possuem polias, engrenagens ou catracas, que transmitem rotação por meio das engrenagens e acoplantes, correias ou correntes de eixo a eixo. O eixo de transmissão pode ser uma parte integral do acionador, como um eixo manivela ou eixo de motor, ou ele pode ser livre, conectando-se ao vizinho por alguma espécie de acoplamento. Estes eixos são montados em mancais, em uma configuração biapoada, em balanço ou saliente, dependendo da configuração da máquina (Robert L. Norton, 2013).

2.1 Cargas em eixos

Em eixos que transmitem rotação, podemos encontrar, de forma predominante, dois tipos de cargas: a carga de torção, originária do torque transmitido pelo eixo, e carga de flexão, que vem das cargas transversais em polias, engrenagens ou catracas. Geralmente, estas cargas estão combinadas, pois o torque transmitido pode estar associado com forças nos dentes de engrenagens ou de catracas fixadas ao eixo. As cargas de torção e flexão podem ser constantes ou variar com o tempo. Em um mesmo eixo, há a possibilidade de ocorrência da combinação de cargas flexionais e torcionais variáveis com o tempo ou fixas (Robert L. Norton, 2013).

Sendo o eixo não rotativo (estacionário), com polias e as engrenagens rodando em relação a ele (em mancais), esse eixo torna-se carregado estaticamente pela duração em que as cargas aplicadas sejam fixas no tempo. Porém, esse eixo não é um eixo de transmissão, já que não transmite nenhum torque, ele é simplesmente um eixo estacionário ou uma viga redonda e pode ser projetado como tal (Robert L. Norton, 2013).

Quando o eixo é rotativo e está sujeito a cargas de flexão transversal fixa, seu estado de tensões será completamente alternado. Qualquer elemento de tensão na superfície do eixo vai da tração à compressão em cada volta do eixo. Portanto, até nas cargas de flexão constante, um eixo rotativo deve considerar em seu projeto as falhas por fadiga (Robert L. Norton, 2013).

2.2 Conexões e concentração de tensões

Podem-se projetar eixos com diâmetro de seção constante por todo seu comprimento, mas normalmente os eixos possuem degraus ou ressalto nos quais o diâmetro varia para acomodar elementos fixados, como por exemplo: mancais, catracas ou engrenagens. O uso de ressalto ou degraus se dá para que haja maior precisão e que a localização axial dos elementos fixados seja mais consistente, assim como, para a criação de um diâmetro que se adeque corretamente ao alojamento de peças padronizadas, como mancais (Robert L. Norton, 2013).

Anéis de retenção, chavetas ou pinos transversais são constantemente utilizados para fixar elementos no eixo, a fim de fornecer o torque necessário, ou para evitar movimento axial. No uso das chavetas, é necessária a presença de um rasgo, tanto na peça quanto no eixo e, além disso, pode haver a necessidade do uso de um sistema de parafusos para erradicar movimentos axiais. Anéis de retenção descavam o eixo e pinos transversais criam um furo através do eixo. A realização destas mudanças no contorno acaba por gerar uma concentração de tensões e esta concentração será considerada quando forem feitos os cálculos para as tensões de fadiga no eixo (Robert L. Norton, 2013).

O uso de pinos e chavetas pode ser substituído pela fixação por atrito (fixação de elementos como engrenagens ou catracas). Nesses projetos, se tem a presença de colares de engaste, que possuem a função de pressionar o diâmetro externo do eixo com uma força de compressão elevada, para que seja viável que se engaste algo a ele. Um furo ligeiramente afunilado é produzido no cubo. O colar de engaste possui um cone similar ao furo, sendo este forçado no vazio entre o eixo e o cubo, por meio de um aperto de parafusos. O diâmetro do colar pode variar, devido à presença de fendas axiais em sua parte afunilada. Essa variação no diâmetro permite que o colar aperte o eixo, gerando suficiente atrito para a transmissão de torque (Robert L. Norton, 2013).

O problema de tensões concentradas parece ser inevitável nas máquinas e em seus elementos. Na utilização de eixos, essas tensões não são erradicadas, mas existem meios de aliviá-las, como o provimento de degraus, maneiras precisas e eficientes de fixação axial, ou uso de pinos chavetas e anéis de retenção (Robert L. Norton, 2013).

Ainda sobre concentradores de tensão, um termo que tem grande relevância em projeto de engenharia é o entalhe. Entalhe conhecido também como descontinuidade, pode ser um chanfro, uma ranhura, ou qualquer espécie de interrupção que venha a ocorrer na superfície lisa da peça. Os entalhes mais comuns em projeto de eixos são os possíveis rasgos para chavetas, ou ranhuras de anéis elásticos e a presença desses elementos pode se tornar um potencial concentrador de tensões (Robert L. Norton, 2013).

O grau de concentração de tensão em um entalhe é indicado por fatores teóricos, são eles K_t , para tensões normais, e K_{ts} , para tensões de cisalhamento, ambos para cargas estáticas. Para

cargas dinâmicas, além dos anteriores, surge mais um fator teórico de concentração de tensões, o K_f , que é denominado fator de concentração em fadiga, e depende diretamente da sensibilidade do material ao entalhe (Robert L. Norton, 2013). A figura 1 traz a relação entre o K_t e a razão r/d , onde r e d dependem das dimensões do entalhe.

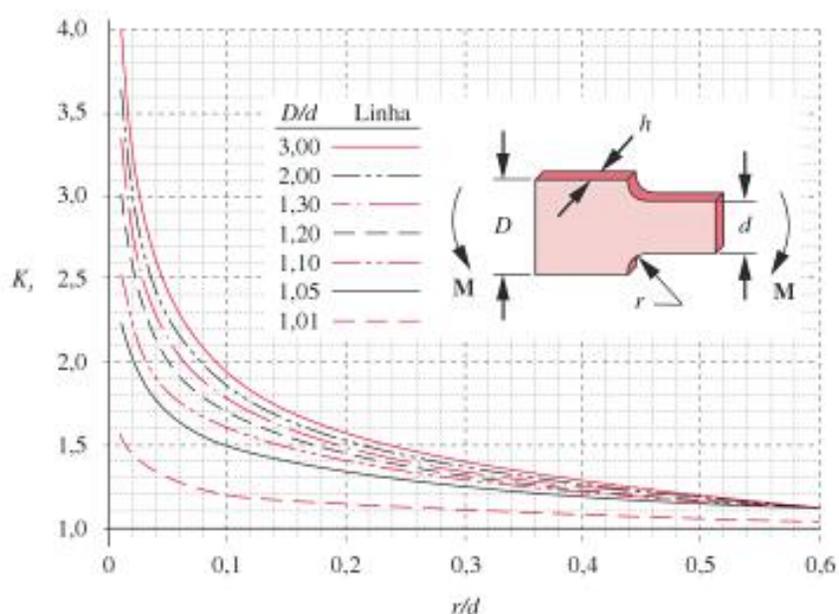


Figura 1: Fator de concentração de tensão K_t em função de uma barra plana (Robert L. Norton, 2013)

2.3 Cargas de Fadiga

Falhas devido à fadiga são provocadas, potencialmente, por qualquer tipo de carga que se alterne com o tempo e o comportamento das cargas muda de acordo com suas diferentes aplicações. Em máquinas rotativas, a amplitude das cargas tende a permanecer consistente no transcorrer do tempo e se repetem com certa frequência. Em equipamentos de serviço, a tendência é que a amplitude e a frequência das cargas variem completamente ao longo do tempo (Robert L. Norton, 2013).

2.3.1 Sensibilidade ao entalhe

Sensibilidade ao entalhe nada mais é do que a susceptibilidade que cada material possui em relação às tensões concentradas. A sensibilidade está diretamente ligada às propriedades mecânicas de cada material, uma vez que, os materiais mais frágeis são mais sensíveis ao entalhe, e os mais dúcteis, menos. Fragilidade e ductilidade são características que se relacionam com a resistência mecânica e à dureza, os materiais duros e de alta resistência tem maior

sensibilidade às descontinuidades em comparação aos pouco duros e baixa resistência. O raio de arredondamento do entalhe é um fator que também influencia na sensibilidade, uma vez que, se este é reduzido, a sensibilidade ao entalhe também decresce (Robert L. Norton, 2013). A sensibilidade ao entalhe é representada pela variável 'q' na equação 1:

$$q = \frac{K_f - 1}{K_t - 1} \quad (1)$$

Onde K_t é o fator de concentração de tensões estático, e K_f é o fator de concentração de tensões em fadiga (dinâmico). Na figura 2 tem-se o gráfico que relaciona a sensibilidade ao entalhe do material com o raio de arredondamento da descontinuidade. A sensibilidade ao entalhe varia entre zero e um.

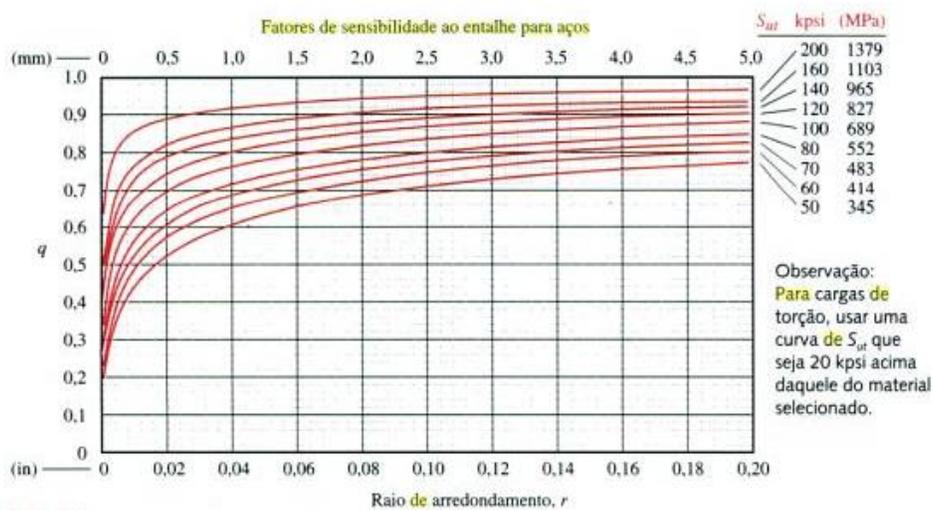


Figura 2: Fatores de sensibilidade ao entalhe para aços (Robert L. Norton, 2013)

2.4 Elementos Fixadores de Eixos

Os elementos de fixação permanente e os de fixação móvel precisam ser selecionados com muita diligência e aptidão, por serem os componentes mais frágeis de um mecanismo. Além disso, é importante planejar e escolher corretamente os fixadores a serem utilizados para evitar concentração de tensão nas peças fixadas. Essas tensões podem causar rupturas nas peças por fadiga do material, assumindo que o material perde resistência devido ao acúmulo de tensões, as quais deveriam ser evitadas (Joseph E. Shigley, 2005).

Existem alguns casos aonde esses dispositivos são projetados para falhar, caso o torque exceda limites projetados, protegendo, assim, o componente mais caro, como o eixo de transmissão. Na figura 3 podem-se observar exemplos de meios de fixação de eixos.

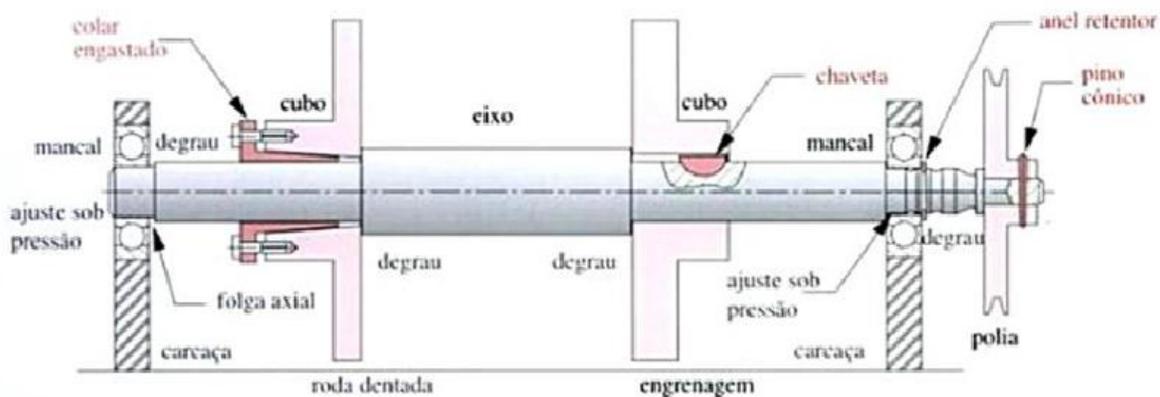


Figura 3: Alguns métodos de fixação de eixos (Joseph E. Shigley, 2005)

2.4.1 Elementos de fixação móvel

Elementos de fixação móvel se caracterizam por serem facilmente instalados e removidos da máquina, podendo também ser reutilizados após a remoção do conjunto, sem ocasionar nenhum tipo de dano aos componentes do mecanismo.

- **Anéis de fixação**

Os anéis de fixação podem ser usados em todos os casos de transmissão de torque onde são usados: pinos, chavetas, parafusos, etc. O anel de fixação é uma solução, principalmente, quando existe a necessidade de serem realizadas diversas montagens e desmontagens, sejam elas para manutenção ou setup de uma máquina. Este elemento pode substituir chavetas e folgas entre eixos na transmissão de torque, além de ser uma opção fácil e barata. Existem anéis de fixação para baixo, médio e alto torque e, estes, são indicados para aplicações em prensas, esteiras transportadoras, alavancas de fixação, etc (Robert C. Juvinall, 2008). A figura 4 traz um exemplo de anel de fixação.

Anéis de fixação são baseados no sistema de cunha, onde a força dos parafusos durante o aperto é transferida como uma elevada força radial que trava os componentes por atrito.

As principais vantagens dos anéis de fixação são:

- As tolerâncias do eixo, anel e cubo permitem um posicionamento preciso e uma fácil montagem (Robert C. Juvinall, 2008);
- A alta precisão de fabricação resulta em um acoplamento com bom balanceamento, permitindo sua aplicação em altas rotações (Robert C. Juvinall, 2008);
- Altas pressões de contato conferem a transmissão de altos torques transmissíveis com grandes momentos de flexão. Assim, a área de contato entre eixo, anel e cubo, fica praticamente isentas de corrosão (Robert C. Juvinall, 2008);
- A ausência de entalhes confere maior resistência dinâmica e estática, com projetos mais leves a um custo inferior em relação aos tradicionais métodos de fixação (Robert C. Juvinall, 2008);
- A grande variedade de anéis, com o fornecimento de peças especiais, amplia as possibilidades de obtermos a solução adequada para a maioria das fixações eixo-cubo (Robert C. Juvinall, 2008).



Figura 4: Anéis de fixação (NEI)

- **Anéis de retenção**

Os anéis elásticos têm como função evitar o descolamento axial do eixo, assim como, posicionar ou limitar o curso de qualquer peça deslizante sobre determinado eixo. O material usado em sua fabricação é o aço SAE 1070, que é o mesmo aço utilizado na produção de molas, o que proporciona uma melhoria em sua aplicação. Estes anéis possuem forma de anel incompleto e são alojados em um canal circular que, geralmente se situa nas extremidades do eixo. Esse canal é construído conforme normalização (Robert C. Juvinall, 2008).

A dureza do anel deve ser adequada aos elementos que trabalham com ele. Caso o anel apresente alguma falha, pode ser devido a defeitos de fabricação ou condições de operação. As condições de operação são caracterizadas por meio de vibrações, impacto, flexão, alta temperatura ou atrito excessivo. Um projeto pode conter erros, prevendo, por exemplo, esforços estáticos, mas as condições de trabalho geraram esforços dinâmicos, fazendo com que o anel apresentasse problemas que dificultaram seu alojamento. A igualdade de pressão em volta da canelada assegura aderência e resistência. O anel nunca deve estar solto, mas alojado no fundo da

caneleta, com certa pressão. A superfície do anel deve estar livre de rebarbas, fissuras e oxidações. Em aplicações sujeitas à corrosão, os anéis devem receber tratamento anticorrosivo adequado, dimensionamento correto do anel e do alojamento. Em casos de anéis de seção circular, utilizá-los apenas uma vez. Devem-se usar ferramentas adequadas para evitar que o anel fique torto ou receba esforços exagerados. É prudente evitar a substituição de um anel normalizado por um “equivalente”, feito de chapa ou arame sem critérios. Para que esses anéis não sejam montados de forma incorreta, é necessário o uso de ferramentas adequadas, no caso, alicates (Robert C. Juvinall, 2008). A figura 5 exemplifica alguns tipos de anéis de retenção.



Figura 5: Anéis de retenção (NEI)

2.5 Chavetas

Chaveta pode ser definida como "uma parte de maquinaria desmontável que quando colocada em assentos, representa um meio positivo de transmitir torque entre o eixo e o cubo". Ou seja, chaveta é um dispositivo utilizado para transmitir momento de torção de um eixo para um elemento como, para acoplamento, para uma engrenagem, para uma polia, para uma luva deslizante ou qualquer componente de um equipamento ou vice-versa. A chaveta é um dispositivo projetado para falhar caso o torque exceda o limite operacional aceitável, devido a isto, ela protege os outros componentes mais caros do equipamento, como por exemplo, um eixo de transmissão (Jack A. Collins, 2006).

A chaveta também é muito útil em casos onde o sincronismo de ângulo de fase é importante, porque serve como uma orientação angular positiva de um componente, isto é, a chaveta é uma referência para realização de determinados ajustes em eixos repletos de cames, que realizam funções importantes de sincronismo (Jack A. Collins, 2006).

Múltiplas chavetas podem ser utilizadas e, quando necessário, são utilizadas mais de uma chaveta para conduzir cargas mais elevadas e geralmente são orientadas a 90° umas das outras. A lógica de uma estria é a mesma de “várias chavetas”, portanto, uma estria com dimensões semelhantes pode transmitir um torque bem mais elevado que uma chaveta (Jack A. Collins, 2006).

2.5.1 Tolerâncias dimensionais para chavetas

O ajuste da chaveta deve ser feito em função das características dos esforços de trabalho aos quais a chaveta estará submetida.

A figura 6 mostra os três tipos mais comuns de ajustes e tolerâncias para chavetas e rasgos.

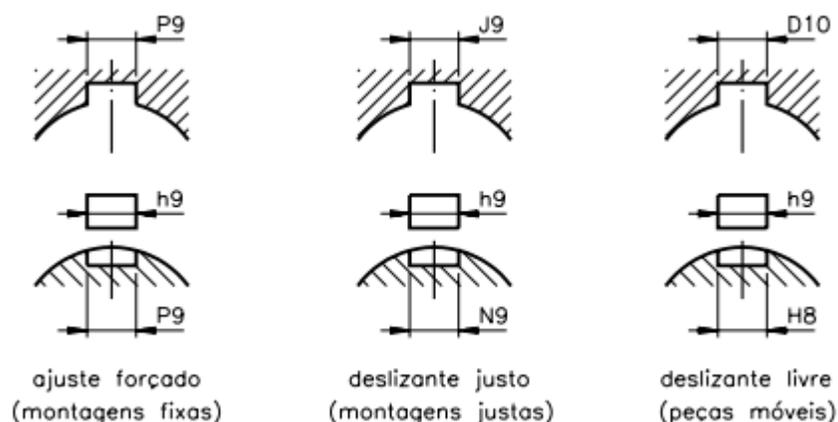


Figura 6: Tipos de tolerâncias (Jack A. Collins, 2006)

2.5.2 Fabricação do rasgo da chaveta

A fabricação do rasgo de chavetas é feita com a utilização de fresas, brochadeiras ou plainas, que retiram material do eixo. Este processo foi impulsionado após a descoberta, no final da década de 20, do metal duro, na Alemanha. O WC (carboneto de Tungstênio) mudou a história dos materiais de ferramenta de corte (o primeiro foi o aço rápido), já que, com esse novo material duro tornou-se mais viável a abertura do rasgo de chaveta (Jack A. Collins, 2006). A figura 7 explicita o processo de abertura de rasgo.

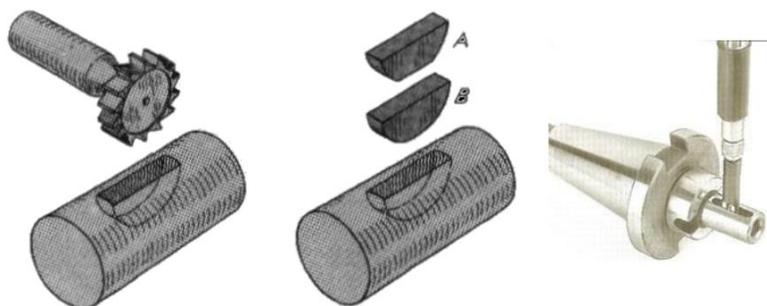


Figura 7: Fabricação do rasgo de chaveta (Jack A. Collins, 2006)

2.5.3 Tipos de chavetas

A chaveta é um dos meios mais efetivos e econômicos de se transmitir torque, abrangendo níveis moderados e elevados, com formas que variam de acordo com as características de trabalho e tipos de esforços (Jack A. Collins, 2006). Existem diversos tipos de chavetas para diversos tipos de aplicações, que se dividem em:

- Chavetas de cunha
- Chavetas paralelas
- Chavetas de disco

2.5.4 Dimensionamento de chavetas

Há poucas variáveis de projeto disponíveis para o dimensionamento de uma chaveta. O diâmetro de eixo no assento da chaveta determina sua largura. A altura da chaveta (ou sua penetração no cubo) também é definida a partir da sua largura. Isso faz com que as únicas variáveis de projeto sejam seu comprimento e a quantidade de chavetas por cubo que serão usadas. Chavetas Woodruff, por exemplo, podem ser obtidas através de um intervalo de diâmetros para uma largura dada, o que, efetivamente, dimensiona seu comprimento de engate ao cubo. Para a escolha apropriada da chaveta deve ser considerada uma série de fatores como: tensões na chaveta, material, fator de segurança tipo de carga e outros (Jack A. Collins, 2006). Na figura 8 se apresenta ilustrado o dimensionamento de chavetas.

- **Fator de segurança**

Fatores de segurança excessivos devem ser evitados ao projetá-las, visto que, é desejável, em situações de sobrecarga, que a chaveta quebre para que os outros componentes mais caros não venham a falhar.

- **Tensão na chaveta**

Há dois modos de falha em chavetas: por cisalhamento e por esmagamento. Uma falha por esmagamento ocorre pelo esmagamento de qualquer lado em compressão. Já a falha cisalhante se dá quando a chaveta é cisalhada ao longo de sua largura na interface do cubo. A figura 9 ilustra a tensão de cisalhamento atuando na chaveta. A tensão média devido ao cisalhamento se dá pela equação 2 abaixo:

$$\tau_{xy} = \frac{F}{A_{cis}} \quad (2)$$

Onde $A_{cis} = b.l$ (largura x comprimento).

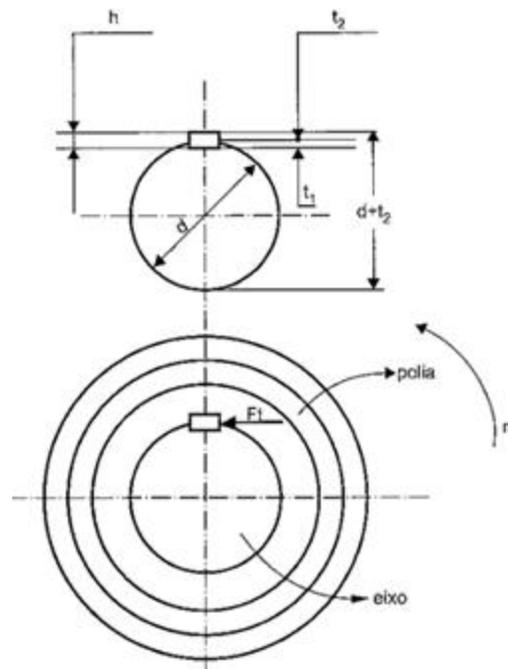


Figura 8: Dimensionamento de chavetas (Jack A. Collins, 2006)

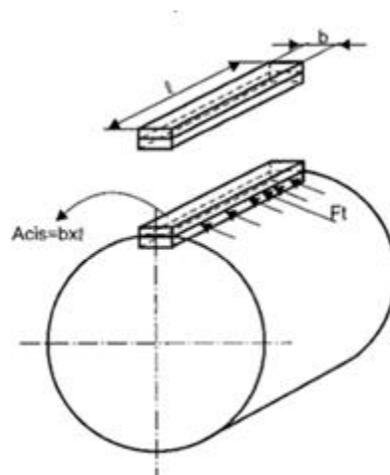


Figura 9: Tensões atuando na chaveta (Jack A. Collins, 2006)

2.5.5 Fabricação / comercialização / padronização

As chavetas mais comuns são fabricadas de aço de baixo carbono e laminadas a frio, de tal forma que suas dimensões nunca excedem a dimensão nominal, permitindo, assim, a utilização de cortadores padronizados nos assentos de chaveta. As chavetas são comercializadas em varas e, com esses cortadores padrões, a chaveta é cortada no comprimento desejado (Robert C. Juvinall, 2008).

A padronização das chavetas é regida pelas normas DIN, AISI e ISSO. Esta padronização foi muito importante para assegurar o devido encaixe da chaveta com o rasgo, sem folgas demasiadas (Robert C. Juvinall, 2008).

Capítulo 3

Colagem Estrutural

O desenvolvimento da tecnologia dos compósitos estruturais tem como, uma de suas finalidades, formar um conjunto de materiais que combine elevados valores de resistência mecânica e rigidez a baixa massa específica. Estes materiais têm mostrado um excelente potencial em aplicações, devido às suas excelentes propriedades mecânicas, como resistências à fratura, à fadiga, à tração e à compressão, bem como sua resistência à corrosão e à propagação de chamas (Antônio G. de Magalhães, 2007)

3.1 Introdução / História

A união mecânica por colagem é utilizada há alguns séculos e sempre foi considerada uma união de baixa confiabilidade, devido aos inúmeros defeitos de operação e/ou defeitos de propriedades das colas existentes até então. Com isso, ficou uma percepção de que a união por colagem oferece poucas garantias quanto à sua resistência mecânica e, sobretudo, quanto à sua durabilidade em longo prazo. Com o advento de novas tecnologias, houve um grande desenvolvimento nas propriedades das colas e a, conseqüente, evolução da colagem em substituição a outros métodos de união em muitas aplicações, especialmente em casos em que a ligação não é exposta ao calor ou desgaste prolongado (Antônio G. de Magalhães, 2007).

O método de ligação por adesivos só evoluiu, significativamente, nos últimos sessenta anos e a principal razão do crescimento de sua aplicação em diversas áreas se deu devido ao surgimento de polímeros sintéticos. Estes adesivos polímeros possuem propriedades que lhes permitem aderir facilmente à grande maioria dos materiais, com resistência capaz de transmitir esforços consideráveis, o que não era possível com os outros tipos de adesivos, contudo, atualmente, uma união colada é considerada uma novidade para muitos, quando é aplicada em estruturas que estão sujeitas a altas cargas e em situações em que são exigidos altíssimos níveis de confiança e durabilidade, como em fuselagem de aviões e carrocerias de carros (Antônio G. de Magalhães, 2007).

No setor industrial, os adesivos e colas ganharam grande importância devido a sua gama de aplicações, graças a sua eficácia e facilidade de aplicação. Estes materiais ganharam espaço no uso das montagens de componentes mecânicos, elétricos e eletromecânicos, além de serem empregados na produção de diversos produtos (Antônio G. de Magalhães, 2007).

3.2 Vantagens

- Maior resistência à fadiga - juntas coladas possuem uma distribuição de tensão mais homogênea, a tensão é distribuída por toda sua extensão. Assim não há pontos que resistem a maiores esforços e nem concentradores de tensão como o que ocorrem com rebites por exemplo. Além disto, uma distribuição uniforme das tensões permite uma maior rigidez e transmissão de carga, possibilitando assim uma redução de peso e custo (Antônio G. de Magalhães, 2007).
- Amortecimento de vibrações e choques - tensões são parcialmente absorvidas pela cola, melhorando assim a resistência à fadiga dos próprios componentes ligados, e diminuindo o desgaste no restante da estrutura (Antônio G. de Magalhães, 2007).
- Possibilita a ligação de diferentes materiais - o processo de colagem tem a excelente capacidade de realizar a união de dois componentes diferentes, mesmo com distintos coeficientes de expansão, principalmente compósitos. Isto é possibilitado devido a grande flexibilidade do adesivo (Antônio G. de Magalhães, 2007).
- Eficiência na ligação de chapas- capacidade de unir materiais metálicos ou não, materiais finos ou espessos de qualquer tipo de superfície (Antônio G. de Magalhães, 2007).
- Automatizável - o processo de colagem é totalmente possível de se automatizar. Desde a etapa de mistura ate a aplicação do adesivo (Antônio G. de Magalhães, 2007).
- Evita concentradores de tensões e surgimento de trincas- pois não há a necessidade de furos nos componentes e marcas devido às soldaduras (Antônio G. de Magalhães, 2007).
- Estanqueidade - Pois as partes unidas por adesivos criam contato contínuo entre as superfícies ligadas (Antônio G. de Magalhães, 2007).
- Minimiza a transferência de calor- funciona como um isolamento térmico, pois a coeficiente de transferência de calor do adesivo é muito menor do que comparado com o do metal (Antônio G. de Magalhães, 2007).
- Redução de custos nos projetos (Antônio G. de Magalhães, 2007).
- Os processos de união por adesivo tendem a ser mais ligeiros e mais econômicos (Antônio G. de Magalhães, 2007).

A colagem permite, ainda, a utilização de novos conceitos de materiais. Um bom exemplo são as estruturas em ninho de abelha, onde o núcleo é colado a duas peles de metal ou compósito, resultando numa excelente rigidez específica.

3.3 Desvantagens

As principais desvantagens inerentes às ligações com adesivos são:

- Limitações por tipo de esforços - é necessário que no projeto seja eliminado o máximo de forças de arrancamento, clivagem e impacto. Quando um dos materiais não é rígido, a ligação pode estar sujeita a forças de arrancamento, e quando os dois materiais são rígidos, a ligação pode estar sujeita a forças de clivagem (Antônio G. de Magalhães, 2007).
- Geometria- É importante usar geometrias que evitem tensões localizadas e que garantam uma distribuição uniforme das tensões. Esforços que não estejam perpendiculares ao adesivo podem causar o surgimento de forças de arrancamento ou de clivagem. A melhor geometria seria em casos que o adesivo esteja apenas submetido às tensões de corte. Ou seja, tensões paralelas à ligação adesiva e distribuída (Antônio G. de Magalhães, 2007).
- Condições extremas- uniões com utilização de adesivos possuem limitações para trabalhar em ambientes de extrema exposição ao calor e a umidade devido a sua natureza polimérica (Antônio G. de Magalhães, 2007).
- Ferramentaria e tempo de cura - Após a aplicação do adesivo, o conjunto tem que ficar em repouso por um tempo, o que chamamos de tempo de cura. E faz se necessário à utilização de ferramentas de fixação para manter as peças nas posições corretas (Antônio G. de Magalhães, 2007).
- Preparação da superfície - para que se obtenha uma boa ligação entre os elementos é necessária à preparação das peças a serem unidas. E este processo ocorre com a utilização de: solventes, ataque químico, primers e etc (Antônio G. de Magalhães, 2007).
- Falta de critério de dimensionamento - ainda não existe uma padronização que permita determinar qual é o dimensionamento ideal do adesivo. Existem apenas boas práticas e outras que se sabe que não funcionam tão bem (Antônio G. de Magalhães, 2007).

3.4 Conceitos Gerais

Adesivo - pode ser definido como um material polimérico que, quando aplicado em superfícies, ambas fiquem unidas. Possui a capacidade de resistir à separação, a qual ocorre devido as forças internas de adesão e coesão, sem modificar significativamente a estrutura. Adesivos ou colas são polímeros formulados à base de resina epóxi, substâncias endurecedoras e vários outros compostos que, misturados, transformam-se em um produto único com características irreversíveis (Antônio G. de Magalhães, 2007).

Adesivo estrutural - É um adesivo que resiste a forças substanciais e que é responsável pela resistência e rigidez da estrutura. (~ MPa ao corte) (Antônio G. de Magalhães, 2007).

Vedantes - É uma substância capaz de ligar duas superfícies preenchendo o espaço entre elas, formando, assim, uma camada ou barreira protetora, o que bloqueia parcialmente ou totalmente a passagem de fluidos (Antônio G. de Magalhães, 2007).

Substrato ou aderente - É o nome que se dá às superfícies a serem unidas por um adesivo (Antônio G. de Magalhães, 2007).

Primers- É a substância aplicada ao substrato para melhorar a adesão e proteger as superfícies até a aplicação do adesivo (Antônio G. de Magalhães, 2007).

Interfase- Fina região na zona de contato adesivo-substrato tem características químicas e físicas diferentes da parte maciça do adesivo ou do substrato. A interfase é um fator crítico na correta determinação das propriedades de uma ligação adesiva (Antônio G. de Magalhães, 2007).

Interface - É o plano de contato entre as superfícies de dois materiais. A interface está contida na interfase. Na interfase podem estar contidas interfaces entre diferentes materiais localizados entre o adesivo e o substrato (Antônio G. de Magalhães, 2007).

Junta - É o conjunto formado pelos substratos, o adesivo e os primers (se presente) e todas as interfases associadas (Antônio G. de Magalhães, 2007).

Adesão - Força de união entre o adesivo e o substrato, baseada nas forças de atração entre as moléculas do adesivo e das superfícies a serem coladas. A força de atração entre as partes ocorre devido às forças de Van der Waals (Antônio G. de Magalhães, 2007).

Coesão - São as forças capazes de manter unidas as partículas (átomos, íons, moléculas) que compõem os adesivos, provenientes das interações químicas entre elas. Esta força é a própria resistência interna, oferecida a esforços do adesivo (força de Van de waals). Quanto mais fortes as forças intermoleculares do adesivo, maior a coesão e, conseqüentemente, a resistência ao

deslocamento (Antônio G. de Magalhães, 2007). A figura 10 ilustra os fenômenos de adesão e coesão em nível estrutural.

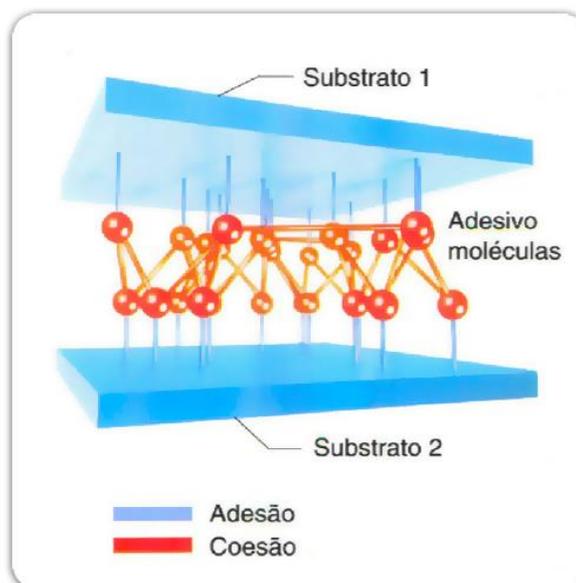


Figura 10: Fenômeno da adesão e da coesão, em nível estrutural (Antônio G. de Magalhães, 2007)

Tempo Aberto – É o intervalo de tempo máximo que se pode aguardar para se obter uma boa colagem, a partir do momento em que o adesivo é aplicado. Este tempo dependerá de alguns fatores como: condições ambientais, tipo de adesivo e a natureza dos substratos (Antônio G. de Magalhães, 2007).

Tempo de Cura - Cura é o nome que se dá ao processo físico-químico através do qual o adesivo sofre um aumento em sua coesão interna. O tempo de cura consiste no tempo necessário para que o adesivo alcance sua máxima coesão interna ou a sua cura completa. Assim como o tempo aberto, também dependerão de fatores como condições ambientais, natureza dos adesivos e sua interação com os substratos (Antônio G. de Magalhães, 2007).

Pega - Consiste na capacidade que o adesivo tem de manter os substratos unidos de imediato, assim que posto em contato. De maneira mais técnica, é a força inicial de adesão que se pode sentir na ausência de pressão (Antônio G. de Magalhães, 2007).

Resistência à temperatura - Capacidade do adesivo quando submetido a uma determinada temperatura a suportar esforços para manter a junta adesiva. Para que isto ocorra, alguns fatores

influenciarão, como o tipo e a intensidade dos esforços aplicados à junta, a natureza do adesivo e sua cura completa (Antônio G. de Magalhães, 2007).

Estabilidade Térmica - É a capacidade que o adesivo tem, quando submetido a altas temperaturas, de manter suas propriedades inalteradas ao longo do tempo (Antônio G. de Magalhães, 2007).

Vida útil - Consiste no tempo máximo em que um adesivo pode ser mantido dentro de sua embalagem original, sem alteração de suas propriedades (Antônio G. de Magalhães, 2007).

Reticulante - São moléculas que, quando adicionadas ao adesivo, funcionarão como catalisadoras na fase de cura, diminuindo assim o tempo de cura. Estas moléculas possuem peso muito menor que o peso molecular da cadeia principal e apresentam, no mínimo, dois grupos funcionais reativos que permitam a formação de ponte entre cadeias poliméricas (Antônio G. de Magalhães, 2007).

3.5 Classificação dos adesivos

Os adesivos podem ser classificados de diversos modos, a classificação mais abrangente seria pela composição do material, no qual se leva em consideração os produtos com que foi fabricado o adesivo, visto que, um adesivo pode ser fabricado por produtos sintéticos ou naturais. Adesivos sintéticos são fabricados com materiais criados pelos homens e os naturais são adesivos vindos de subprodutos animais ou de agricultura. A tabela 1 o final deste capítulo mostra o desempenho mecânico de alguns tipos de adesivos.

Outras duas formas de classificar os adesivos seriam:

- Pela propriedade de cura
- Pela composição química

3.5.1 Propriedade de cura

Neste tipo de classificação leva-se em conta a forma como esses adesivos irão realizar a cura, podendo ser classificados da seguinte forma:

- **Adesivos que curam por reação química**

- i)** Duas partes.
- ii)** Cura com umidade.
- iii)** Catálise pelo substrato ou anaeróbicos.
- iv)** Forma sólida (filme, fita, pó, etc).

A maioria dos adesivos termoendurecíveis reticula e cura através de duas reações químicas principais. Por reação de condensação, onde os compostos reagem porque contêm grupos químicos que são mutuamente reativos ou por polimerização de adição, onde os compostos contendo anéis ou ligações duplas podem ser polimerizados por uma reação em cadeia. Para iniciar a cura é preciso um agente de cura ou catalisador. Há reação de curas contínua à temperatura ambiente ou a temperaturas elevadas, dependendo da natureza da reação.

Os adesivos reativos são bastante utilizados para os epóxidos, os poliuretanos, acrílicos modificados, cianoacrilatos e sistemas anaeróbicos.

i) Adesivo de várias partes:

São sistemas constituídos por duas ou mais partes e que devem ficar separados até a etapa de colagem. Os componentes devem ser medidos nas corretas proporções, misturados e aplicados. Exemplo: A parte A (resina) pode ser aplicada num substrato e a parte B (catalisador) é aplicado no outro substrato, com isso a cura só é efetivamente realizada quando se unem os dois substratos. Os epóxidos, poliuretanos, acrílicos, fenólicos e silicones são exemplos deste tipo de adesivo. A maior parte deles cura a temperatura ambiente, mas é possível utilizar calor para acelerar o processo de cura (Antônio G. de Magalhães, 2007).

ii) Adesivos que curam com umidade:

São adesivos que utilizam a umidade para reagir com a resina base. A umidade reage com as moléculas e forma uma estrutura sólida. Para que este adesivo tenha uma cura completa é preciso que ele tenha acesso ao ar, pois, com substratos não porosos, este adesivo irá curar apenas nas bordas da junta que estão expostas ao ar. O endurecimento das bordas impede que a umidade chegue ao centro do adesivo e isso acarreta uma cura não completa. Este tipo de adesivo cura a temperatura ambiente, embora haja aceleração ao contato com altas umidades e, em alguns casos, com temperatura (Antônio G. de Magalhães, 2007).

Os poliuretanos e silicones são adesivos de um componente que cura por reação com a umidade e que também funcionam como vedantes, nesta categoria encontram-se os silicones e os uretanos. Já no que tange o grupo dos silicones, o endurecimento se dá pela reação com a umidade do ambiente. O silicone de borracha sólida, por exemplo, apresenta excelente resistência térmica, baixo módulo de elasticidade, alto alongamento e é um ótimo vedante para

uma grande variedade de fluidos. Os poliuretanos, que pertencem à família dos uretanos, são formados a partir de uma reação da água com aditivos, contendo grupos de isocianetos. Apresentam excelente resistência e flexibilidade, além de serem muito bons para preencher folgas de até 5 mm (Antônio G. de Magalhães, 2007).

iii) Adesivos catalisados pelo substrato ou Anaeróbicos:

São adesivos que se solidificam em temperatura ambiente quando não estão em contato com o oxigênio, ou seja, a união dificulta o contato com o oxigênio, fazendo com que a cura ocorra rapidamente, principalmente em peças de natureza metálicas. A cura ocorre devido à reação química que utiliza os íons metálicos ativos, como o cobre e o ferro, encontrados no substrato como um catalisador (Antônio G. de Magalhães, 2007).

Estes adesivos oferecem grande resistência ao cisalhamento, às vibrações, boa resistência à umidade e devem operar dentro da seguinte faixa de temperaturas: -55°C a 230°C . Resistem às cargas dinâmicas, dispensam acabamento (visto que rugosidades entre 8 mm e 40 mm são aceitáveis), são excelentes vedantes, além de sofrerem cura rápida e serem fáceis de aplicar, sendo muito utilizados em peças de máquinas. Os adesivos anaeróbicos são bastante utilizados para retenção de porcas e vedação e foram criados pela Loctite Corporation (Antônio G. de Magalhães, 2007).

iv) Adesivos no estado sólido (fita, filme, pó):

Os adesivos no estado sólido são feitos de várias formas. Um dos métodos consiste em preparar o adesivo no estado líquido e depois realizar uma solidificação, sem que ocorra cura completa. Adesivos B-staged, que são parcialmente curados, podem escoar caso receba aplicação de pressão e calor. Os adesivos B-staged podem ser moídos num pó, que pode ser aplicado por peneiração ou eletrodeposição. O pó pode, ainda, ser pré-formado com compressão num molde e usado numa geometria mais complexa (Antônio G. de Magalhães, 2007).

Outra forma é com os adesivos em fita ou filmes, no qual o processo de endurecimento é comumente seguido de extrusão, calandragem ou vazamento em um filme/fita com espessuras geralmente entre 0.127mm a 0.254mm. Após a aplicação de um filme ou fita entre os substratos a serem unidos, deve ser aplicado calor e pressão para tornar o adesivo suficientemente fluido para aderir nos substratos (Antônio G. de Magalhães, 2007).

3.5.2 Composição Química

- **Origem animal**

Começou a ser fabricado nos Estados Unidos e é o adesivo conhecido mais antigo. Foi destaque comercial por cerca de 150 anos. Os adesivos de caseína e amido começaram a ter importância comercial há menos de uma geração, os de proteína de soja há cerca de 30 anos. Os adesivos de resina sintética começaram a ser formulados depois de 1940 e podem ser subdivididos em: Colas animais, adesivos protéicos e adesivos de amido (Antônio G. de Magalhães, 2007).

- **Inorgânicos**

Estão neste grupo os vidros e as cerâmicas para uso em altas temperaturas, além do silicato de sódio, em caixas onduladas (Antônio G. de Magalhães, 2007).

- **Copolímeros e Misturas**

Utilizados para obtenção de melhores propriedades em comparação aos adesivos monocomponentes, com boa adesão e resistência a temperatura elevada. Pertencem a esse grupo: epóxi usada com náilon, epóxi usada com resinas fenólicas, epóxi usada com poliamidas, epóxi usada com silicones e epóxi usada com uretanas. Resinas nitril-fenólicas e vinil-fenólicas também (Antônio G. de Magalhães, 2007).

3.6 Propriedades químicas

Os adesivos são também classificados por suas propriedades químicas.

3.6.1 Termostáveis elásticos / elastoméricos

São resistentes à água, ao sol e às vibrações durante longos períodos. Muito utilizados como vedantes, colam o material de modo que seja excluída a ação do tempo ou de gases, sem que a resistência da junta tenha grande importância. Para sua produção, são usados silicones, uretanas, borrachas e polissulfetos.

- i) Colas de silicone:

Comercializados em tubos e com aparência semelhante ao silicone para calafetar, também formam ligas muito fortes e resistentes a altas e baixas temperaturas. Utilizados em calhas e materiais de construção, mas também em tecidos e alguns plásticos e cerâmicos, por ficarem

flexíveis após a secagem. A formação de película ocorre em aproximadamente 1 hora, entretanto o tempo total de cura é de 24 horas (Antônio G. de Magalhães, 2007).

ii) Colas de resorcinol:

Formam ligas fortes e duráveis, além de serem à prova d'água, são bastante resistentes a temperaturas extremas, produtos químicos e fungos. O tempo de cura varia entre 18 e 24 horas, dependendo da umidade e temperatura (Antônio G. de Magalhães, 2007).

3.6.2 Adesivos estruturais

Indicadas para uso em metais, plásticos e vidros, são colas geralmente à base de metacrilato. Em alguns casos podem substituir soldas pela sua alta resistência. A secagem prévia é rápida e a cura total é de 24 horas.

i) Cola epóxi

Devem-se utilizar duas soluções: resina e o endurecedor. As substâncias misturam-se bem, imediatamente antes do uso. A cola epóxi deve ser totalmente utilizada, pois a mesma não pode ser reutilizada. O tempo de secagem é de aproximadamente 12 horas, mas seu tempo total de cura é de 24 horas. São muito fortes, duráveis e resistentes à água, por isso, recomenda-se o uso em metais, cerâmicas, alguns plásticos e borracha, mas não no caso de materiais flexíveis (Antônio G. de Magalhães, 2007).

ii) Colas de poliuretano

Trata-se de uma pasta âmbar, comercializada em tubos, de liga forte, bastante semelhante a do epóxi. Muito utilizado para uso em madeira, metal, cerâmica, vidro, plásticos e fibra de vidro. Apresentam certa flexibilidade após a secagem, por isso também podem ser usadas em couro, tecidos, borracha e vinil. O tempo de cura é de aproximadamente 24 horas. Sua vida útil é curta e possui um custo relativamente alto (Antônio G. de Magalhães, 2007).

iii) Super colas ou colas instantâneas

Seu nome original é cola de cianocrilato. Apresenta a vantagem de possuir secagem rápida. Algumas marcas dão o tempo de secagem de 3 minutos, mas a cura total é de 24 horas. Devem ser aplicadas com moderação, pois formam uma liga muito forte. Têm uso indicado em: metal, cerâmica, vidro, alguns plásticos e borracha. Também não são recomendadas para aplicações em superfícies flexíveis (Antônio G. de Magalhães, 2007).

3.6.3 Adesivos termoplásticos

São originalmente polímeros sólidos que amolecem ou fundem quando aquecidos. Podem ser fundidos e moldados após o processo de cura, indefinidamente. Mas a exposição repetida a elevadas temperaturas requeridas para fundição podem causar degradação devido à oxidação, o que limita o número de ciclos térmicos.

Adesivos termoplásticos tem uma temperatura de trabalho mais restrita do que os termoendurecíveis. Apesar de alguns termoplásticos possuírem excelente resistência ao cisalhamento a temperaturas moderadas, esses materiais não são reticulados e tendem a fluir quando submetidos a cargas baixas e a baixas temperaturas. Outra limitação é a baixa resistência a solventes ou agentes químicos (Antônio G. de Magalhães, 2007).

- **Tipos de ramificações**

Recomendado para materiais porosos, como papel, tecido, madeira e etc. tendo como principais características: não ser resistente à água, custo relativamente baixo e ser não inflamável. Uma secagem parcial (para que a cola fique firme) se dá entre 30 minutos e 1 hora. Já a secagem completa dura de 18 a 24 horas (Antônio G. de Magalhães, 2007).

- **Adesivos Híbridos**

Os adesivos híbridos são feitos com resinas termoendurecíveis, termoplásticas e elastoméricas num único adesivo. O objetivo desta combinação é obter um adesivo com a vantagem de cada tipo de resina. Exemplos: resinas rígidas e frágeis para alta temperatura são combinadas com adesivos elastomérico ou termoplástico que são tenazes. Assim, consegue-se um adesivo com melhor resistência ao arrancamento e com melhores capacidades térmicas [9].

Outro método para melhorar a tenacidade é aplicando uma microestrutura específica no adesivo, microestrutura esta que consiste em uma fase elastométrica. São fisicamente pequenas, mas, quimicamente interligadas, criam uma barreira que dificulta a propagação de trincas [9].

Polímeros de vinilo e acrílico-butadieno com extremidades de carboxilo podem ser dispersos numa resina de epóxido ou numa resina de acrílica. Esses adesivos combinados têm alta resistência ao arrancamento, ao impacto e corte sem sacrificar a resistência química e a resistência a altas temperaturas (Antônio G. de Magalhães, 2007).

Tabela 1: Desempenho mecânico dos tipos de adesivo (Antônio G. de Magalhães, 2007)

Química do adesivo ou tipo	Temperatura ambiente resistência ao cisalhamento sobreposto, MPa	Resistência de descolamento por unidade de largura, kN/m
Sensível à pressão	0,01-0,07	0,18-0,88
Base de amido	0,07-0,7	0,18-0,88
Celulósico	0,35-3,5	0,18-1,8
Base de borracha	0,35-3,5	1,8-7
Derretimento a quente sinteticamente projetado	0,7-6,9	0,88-3,5
Emulsão de PVAc	1,4-6,9	0,88-1,8
Cianoacrilato	6,9-13,8	0,18-3,5
Base de proteína	6,9-13,8	0,18-1,8
Acrílico anaeróbico	6,9-13,8	0,18-1,8
Uretano	6,9-17,2	1,8-8,8
Acrílico de borracha modificada	13,8-24,1	1,8-8,8
Fenólico modificado	13,8-27,6	3,6-7
Epóxi não modificado	10,3-27,6	0,35-1,8
Bis-maleimida	13,8-27,6	0,18-3,5
Poliamida	13,8-27,6	0,18-0,88

Capítulo 4

Estudo de adesivos para substituição de chavetas

Neste capítulo, estudaremos a viabilidade da substituição de chavetas por adesivos estruturais, no qual será comparada a resistência ao cisalhamento, resistência a fadiga e viabilização econômica para a que a substituição seja eficaz.

Estudo de caso - Para realizar tal estudo foi escolhida uma situação real na indústria, onde atualmente é utilizada uma engrenagem de aço 1020 com 1" de espessura, que é solicitada a um torque de 50 N.m, possui diâmetro interno de 21 mm e uma chaveta de 6 mm x 6 mm x 25 mm. Os valores da largura e da altura da chaveta são padronizados e dependem do diâmetro do eixo (Robert L. Norton, 2013). A engrenagem do estudo pode ser visualizada na figura 11.



Figura 11: Engrenagem aço 1020 utilizada em tear

4.1 Propriedades mecânicas do aço 1020

O aço 1020 foi o material usado em nossos elementos, como eixo, chaveta e engrenagem. Segue abaixo suas propriedades mecânicas utilizadas na memória de cálculo desse estudo (Joseph E. Shigley, 2005).

- Resistência ao cisalhamento (τ) = 250 MPa
- Resistência à tração (S_{ut}) = 420 MPa
- Limite de escoamento (S_y) = 210 MPa

4.2 Análise comparativa da tensão de cisalhamento entre projeto com chaveta e projeto com junta colada

Com o intuito de especificar corretamente o adesivo para substituição da chaveta, foram realizadas as seguintes etapas:

- Cálculo de tensão de cisalhamento para ruptura da chaveta
- Cálculo da área da junta colada
- Cálculo da tensão de cisalhamento mínima do adesivo
- Seleção do adesivo

4.2.1 Cálculo da tensão de cisalhamento para ruptura da chaveta

Considerando uma chaveta de aço 1020 e dimensões da área que resistirá ao cisalhamento de 6 mm x 25 mm (b x L), de acordo com a equação 2 e figura 12 temos:

$$\tau_{\text{cisalhamento}} = 250 \text{ Mpa} = 25,5 \text{ kgf/mm}^2$$

$$\text{Área da chaveta} = 150 \text{ mm}^2$$

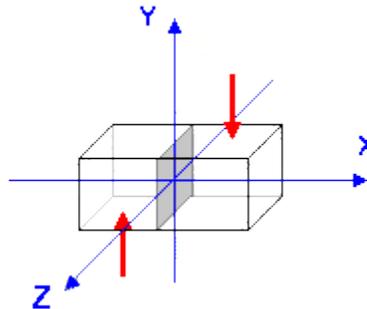


Figura 12: Cisalhamento simples (RobertL.Norton, 2013)

Assim,

$$\tau_{xy} = \frac{F}{A_{cis}}$$

$$F = 3825 \text{ kgf}$$

$$F = 37510 \text{ N} = 37,5 \text{ kN}$$

Concluimos que, para ocorrer o cisalhamento da chaveta, a força necessária é de aproximadamente 37,5 kN.

4.2.2 Cálculo da área da junta colada

A área resistente na junta a ser colada corresponde à área interna do furo da engrenagem, que consiste no produto entre o perímetro e a espessura da engrenagem.

$$\text{Perímetro} = \pi d$$

Considerando um eixo com 21 milímetros de diâmetro e a largura da engrenagem de 1 polegada (25,4 mm), temos:

$$A = \pi d \times L$$

$$A = 3,14 \times 21 \times 25,4 = 1675 \text{ mm}^2$$

4.2.3 Cálculos da tensão de cisalhamento mínima do adesivo

Antes da seleção do adesivo será necessário obter o valor da tensão mínima de cisalhamento, o que será possível com os valores da área resistente e força de ruptura da chaveta já calculados.

$$\tau = F / A$$

$$\tau = 37510 \text{ N} / 1675 \text{ mm}^2$$

$$\tau_{\text{min}} = 22 \text{ N} / \text{mm}^2$$

Então a tensão mínima necessária do adesivo a ser selecionado é de 22 N/ mm²

4.2.4 Seleção do adesivo

Na etapa de seleção de adesivos buscamos o que se adequaria mais para uma colagem de aço 1020 com rápida cura, visando redução no tempo de montagem da junta. A junta colada deverá resistir a esforços predominantemente tangenciais, suportar baixa carga axial e vibrações.

A engrenagem terá sua temperatura nominal de trabalho em torno de 40°C e não estará exposta a produtos químicos nem condições climáticas. Com o objetivo de facilitar a aplicação, o adesivo a ser selecionado não deverá ter sua cura iniciada com utilização de catalisador, recomendam-se, então, adesivos anaeróbicos ou que curam devido à exposição à umidade do ar.

O adesivo a ser selecionado deverá resistir à tensão mínima de cisalhamento próximo a 22 N/mm². Outro fator relevante a ser considerado é o custo do adesivo. Após analisarmos tais premissas, buscamos com fornecedores e catálogos, adesivos que atendessem às exigências. Assim, os adesivos selecionados foram LOCTITE 422, LOCTITE 660 e Araldite Hobby.

- **LOCTITE 422**

O produto Loctite 422 é um adesivo de cianoacrilato, monocomponente, com base química de etilcianoacrilato, incolor. Os cianoacrilatos são adesivos de um componente curado extremamente rápido, conhecidos como adesivos instantâneos, o comercial Super Bonder (Henkel).

Loctite 422 adere uma grande variedade de metais, plásticos ou borrachas. Indicado para aderir materiais rugosos e com superfície irregular e, para aplicações que precisem de tempo de alinhamento até 15 segundos. O material curado apresenta 22 N/mm² de resistência ao cisalhamento médio e custa R\$ 64,00 (Henkel).

Em condições normais, a umidade da superfície inicia o processo de endurecimento, embora, a resistência funcional plena, seja obtida em período relativamente curto, a cura prossegue por no mínimo 24 horas antes de produzir resistência plena a produtos químicos/solventes. A velocidade de cura vai depender do substrato usado, no caso do aço é de 35 segundos. Para aplicação do adesivo, as superfícies devem estar e sem oleosidade e o excesso de adesivo pode ser removido com solventes, acetona ou nitrometano (Henkel). A figura 13 ilustra um tubo de Loctite 422.



Figura 13: LOCTITE 422 (Henkel)

Resistência ao cisalhamento Loctite 422 média = 22 N/mm²

$$\tau = F / A$$

$$F = 22 \times 1675$$

$$F = 36850 \text{ N} = 36,8 \text{ kN}$$

Conclui-se que, como a área a ser colada é maior do que a área resistente da chaveta somados a alta resistência ao cisalhamento da cola, que o LOCTITE 422, para a situação estudada, resiste tanto quanto a força teórica requerida para rompimento da chaveta.

- **LOCTITE 660**

O Loctite 660 é um compósito acrílico com base química de uretano metacrilato e sua aparência é de pasta cinza metálica, possui alta viscosidade, com alta resistência e sua aplicação visa à fixação. Indicado para fixação de componentes cilíndricos, onde as folgas podem atingir até 0,5 mm. A cura deste produto é anaeróbica, ou seja, cura na ausência de ar, e quando confinado entre superfícies metálicas, evitando também o vazamento e afrouxamento originados por impacto e vibração. É indicado para restaurar o ajuste de montagem sobre chavetas danificadas, eixos desgastados e rolamentos frouxos (Henkel).

Loctite 660 é comercializado em embalagens de 50 ml no valor de R\$ 160,00 e seu tempo de fixação em aço é de 60 minutos, seu intervalo de temperatura de funcionamento varia de - 55° C a 150° C. O material curado possui uma resistência ao cisalhamento média de 23,6 N/mm² e mínima de 17,2 N/mm². A aplicação do adesivo deve ser feita após as superfícies serem limpas e desengorduradas e é necessário deixar as peças em repouso até atingirem suficiente resistência. Para desmontagem basta aplicar calor na região a uma temperatura aproximada de 250° C, o que pode ser feito com um maçarico. A desmontagem deve ser feita enquanto a peça estiver aquecida. A figura 14 mostra a aplicação do Loctite 660 (Henkel).



Figura 14: Aplicação do LOCTITE 660 (Henkel)

A resistência ao cisalhamento varia de 17,2 a 30 N/mm²

Resistência ao cisalhamento Loctite 660 média = 23,6 N/mm²

$$\tau = F / A$$

$$F = 23,6 \times 1675$$

$$F_{\text{méd}} = 39530 \text{ N} = 39,5 \text{ kN}$$

Conclui-se que, como a área a ser colada é maior do que a área resistente da chaveta somados a alta resistência ao cisalhamento da cola média, que o LOCTITE 660, para a situação estudada, é superior à força teórica requerida para rompimento da chaveta.

- **ARALDITE**

Araldite é um adesivo bicomponente, à base de resina epóxi, conhecido como um dos mais fortes fixadores da atualidade, tendo assim características muito boas de adesividade e resistência, podendo ser usada em uma grande variedade de reparos. Esta cola consegue colar materiais como vidro, cerâmica, madeira, metal, couro, tijolo, grande parte dos plásticos duros, borrachas e outros materiais. Apresenta resistência à temperatura de 70°C e, depois do endurecimento, adquire uma densidade de 1,1 g/cm³ e uma resistência ao cisalhamento de 18 a 22 N/mm². O tempo de armazenamento, sem abrir os recipientes de resina e endurecedor, é de

três anos, já que, uma vez abertos, o tempo útil decai para a média de oito meses a um ano. Para diluição e limpeza, deve-se utilizar o solvente B-57 (BRAFIX).

O araldite é comercializado numa embalagem composta por 2 tubos de 8 gramas cada, e um misturador, que é uma pequena superfície plástica para a mistura dos dois componentes. Um tubo é composto pela resina epóxi, com concentração de 60-100%, e o segundo tubo tem como componente um endurecedor, à base de Poliamidas, com concentração também de 60-100%. O produto é vendido em embalagem de 16g por aproximadamente 14 reais (BRAFIX). A figura 15 ilustra a embalagem do Araldite.

O modo de usar esta cola deve seguir as seguintes etapas:

- Limpeza da superfície onde será aplicado Araldite.
- Colocar a mesma quantidade do Componente A (Resina) e do Componente B (Endurecedor) no misturador.
- Misturar até obter uma mistura homogênea. Utilizar a mistura em até no máximo 5 minutos. Tempo final de secagem: 8 horas.
- Aplicar uma camada fina da mistura sobre as duas partes, pressionar e aguardar a secagem completa.
- Fechar as bisnagas com as tampas corretas.
- Após o uso, lavar as mãos com água e sabão. Para reutilizar o misturador, esperar o adesivo endurecer, flexionar a base e retirar a camada endurecida.



Figura 15: Araldite Hobby (BRAFIX)

Resistência ao cisalhamento Araldite Hobby = 22 N/mm²

$$\tau = F / A$$

$$F = 22 \times 1675$$

$$F_{\text{méd}} = 36850 \text{ N} = 36,85 \text{ kN}$$

Conclui-se que, como a área a ser colada é maior do que a área resistente da chaveta somados a alta resistência ao cisalhamento da cola média, que o ARALDITE, para a situação estudada, resiste tanto quanto à força teórica requerida para rompimento da chaveta.

4.3 Análise comparativa de fadiga em projeto com chaveta e em projeto com junta colada

A fadiga pode ser um enorme problema quando se trabalha com máquinas que operam de forma cíclica, contudo, existem métodos teóricos de determinação da resistência à fadiga quando não se é possível determiná-lo por meio de ensaios, de modo a se prevenir as prováveis falhas. Neste estudo, serão analisados os conceitos para estimar a falha por fadiga e comparados os resultados da resistência de um eixo com rasgo de chaveta e de um eixo sem esta descontinuidade, que seria fixado através do adesivo.

4.3.1 Cálculo do limite de resistência à fadiga S_e

Para aços, o limite de resistência à fadiga é calculado pela equação 3:

$$S_e' = 0,5S_{ut} \quad (3)$$

Para S_{ut} menor ou igual a 1400 MPa. S_{ut} é o limite de resistência à tração mínima, o que em casos em que este for superior a 1400 MPa, usamos $S_e' = 700$ MPa. A variável S_e' corresponde ao limite de resistência à fadiga sem os fatores de correção considerados (Robert L. Norton, 2013).

Esses fatores, que modificam o limite de resistência à fadiga, serão considerados para a obtenção do S_e absoluto. Esses modificadores dependem dos efeitos da condição de superfície, do tamanho do eixo, do carregamento, da temperatura em que será realizada a operação e de mais alguns itens variados (Robert L. Norton, 2013).

. O cálculo do verdadeiro limite de resistência à fadiga é dado pela equação 4:

$$Se = ka.kb.kc.kd.ke.Se' \quad (4)$$

Onde ka = fator de modificação de condição de superfície; kb = fator de modificação do tamanho; kc = fator de confiabilidade; kd = fator de modificação de temperatura; ke = fator de concentração de tensões. Estes são os fatores usados para estimar a resistência à fadiga.

- **Fator de acabamento superficial (k_a)**

O fator de modificação de superfície depende da qualidade do acabamento, da superfície do elemento mecânico e da resistência à tração do seu material e é representado pela equação 5 (Robert L. Norton, 2013):

:

$$ka = aS_{ut}^b \quad (5)$$

Onde S_{ut} é a resistência mínima à tração, e os valores das variáveis a e b são retirados da tabela 2:

Tabela 2: Fatores a e b de acordo com o acabamento superficial (Norton, 2013)

Acabamento Superficial	Fator a		Expoente b
	[KPSI]	[MPa]	
Retificado	1,34	1,58	-0,085
Usinado ou laminado a frio	2,7	4,51	-0,265
Laminado a quente	14,4	57,7	-0,718
Forjado	39,9	272	-0,995

O aço usado neste projeto foi usinado, portanto o valor de $a = 4,51$, e $b = -0,265$. O valor de S_{ut} para o aço 1020, de acordo com a tabela 2, é de 420 MPa. O valor de ka então é: $4,51(420)^{-0,265} = 0,909$.

- **Fator de tamanho (k_b)**

A avaliação deste fator é realizada retirando um considerável número de dados de diversos ensaios (Robert L. Norton, 2013). Os resultados para flexão e tração são expressos pelas seguintes equações 6 e 7: (lembrando que, para cargas axiais, o fator de tamanho é descartado, tornando $kb = 1$)

$$kb = (d/7.62)^{-0.107} = 1,24d^{-0.107} \quad 2,79mm \leq d \leq 51mm \quad (6)$$

se d for maior do que 51mm. A fórmula passa a ser: $1,51d^{-0.157}$ (7). Vale ressaltar que essas equações são usadas quando a seção for circular. Nesse estudo, o diâmetro do eixo é de 21mm, portanto:

$$kb = (21/7.62)^{-0.107} = 0,897$$

- **Fator de confiabilidade (k_c)**

O fator de confiabilidade se refere à possibilidade de um equipamento ou elemento trabalhar de maneira adequada, ou seja, quando não houver falhas durante seu período de uso (Robert L. Norton, 2013). Os valores de k_c são retirados da tabela 3:

Tabela 3: Fator de confiabilidade (Norton, 2013)

Confiabilidade [%]	Variante de transformação [Z]	Fator de confiabilidade - k_c
50	0	1.000
90	1.288	0.897
95	1.645	0.868
99	2.326	0.814
99.9	3.091	0.753
99.99	3.719	0.702
99.999	4.265	0.659
99.9999	4.473	0.62

Nesse projeto foi considerada uma confiabilidade de 99% do equipamento, portanto, o valor de k_c à ser utilizado é de 0,814.

- **Fator de temperatura (k_d)**

Este fator leva em consideração a temperatura do ambiente em que a operação será realizada. Nesse estudo, foi determinado $k_d = 1$, pois este é o valor estimado para quando se trabalha com temperaturas inferiores a 450° C (Robert L. Norton, 2013).

- **Fator de concentração de tensões (k_e)**

A presença de descontinuidades como, sulcos, rasgos de chaveta ou orifícios, em uma peça ou eixo, eleva de maneira significativa as tensões nas regiões próximas às estas irregularidades. O fator de concentração avalia o quanto este aumento pode influenciar no limite de resistência à fadiga da peça. O fator de concentrações de tensões depende diretamente do fator k_t e da sensibilidade ao entalhe q (Robert L. Norton, 2013). A equação 8 determina o valor de k_e :

$$k_e = \frac{1}{1+q(kt-1)} \quad (8)$$

A sensibilidade ao entalhe q , de acordo com a figura 2, depende do valor de S_{ut} e do valor do raio de arredondamento do entalhe r , em polegadas. Para este projeto, foi estabelecido o valor de r sendo 0,05pol, e o S_{ut} do aço 1020, como já visto anteriormente, é de 420 MPa. Portanto, de acordo com o gráfico, o valor de $q = 0,68$.

De acordo com o gráfico da figura 1, o valor de k_t depende diretamente da razão entre o diâmetro externo do eixo D com o diâmetro interno (considerando o entalhe) d , e da razão entre o raio de adoçamento com este diâmetro interno. Para este caso, tem-se que: $D = 21\text{mm}$, $r = 1,27\text{mm}$ e d vai ser igual ao diâmetro externo menos a profundidade do rasgo da chaveta, que vale 6mm (chaveta 6x6), logo, $d = 21 - 6 = 15\text{mm}$. Com isso, o valor da razão $D/d = 1,4$, e a razão $r/d = 0,08$. Pode-se assim retirar do gráfico o valor de k_t , que equivale a 1,7.

Assim, o valor definitivo de k_e será:

$$k_e = \frac{1}{1 + 0,68(1,7 - 1)} = 0,678$$

4.3.2 Cálculo de S_e para eixo com rasgo de chaveta

Depois de definidos todos esses parâmetros, pode-se finalmente calcular o limite de resistência à fadiga do eixo, usando a equação 4:

$$S_e = k_a \cdot k_b \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_e \cdot S_e'$$

Substituindo os valores, tem-se:

$$S_e = 0,909 \cdot 0,895 \cdot 0,814 \cdot 1 \cdot 0,678 \cdot 210 = 94,3 MPa$$

4.3.3 Cálculo de S_e para eixo sem rasgo

Esse cálculo será feito como o valor de $k_e = 1$, pois o eixo não possuirá nenhuma descontinuidade ou entalhe, pois será fixado por adesivo. O novo valor de S_e será:

$$S_e = 0,909 \cdot 0,895 \cdot 0,814 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 210 = 139,06 MPa$$

Fica provado assim, que, em termos de resistência à fadiga, um eixo fixado por colagem e sem entalhes é mais recomendado para o aumento da vida útil do eixo, já que este não apresentará rasgo, que é um potencial concentrador de tensões e é o ponto do eixo mais propício ao início da propagação de trincas.

4.4 Análise comparativa econômica entre projeto com chaveta e projeto com junta colada.

Ao se relacionar economicamente projetos com chaveta e projetos com junta colada, devem-se analisar alguns fatores. O primeiro fator a ser analisado é o tipo de montagem, que pode ser a manutenção de elementos quebrados ou um projeto novo, com elementos que serão ainda confeccionados. Outro fator muito importante a ser levado em consideração, é o tempo de montagem do conjunto, pois quando estamos tratando de uma manutenção corretiva, por exemplo, é necessário que a ação seja a mais rápida possível para a maioria dos casos. Quando se trata de um projeto, seja inicial, no que concerne a parte de desenho ou já na montagem, é possível uma programação, o que, com isto pode ser antecipado, conferindo e providenciando elementos para montagem.

4.4.1 Análise econômica em montagens de manutenção corretiva

Neste tipo de situação, o principal fator a ser levado em consideração é o tempo de “máquina parada”, isto é, o tempo de interrupção de determinada maquinaria, o que deve ser otimizado ao máximo. Quando há a quebra de um elemento sem indicações prévias, verifica-se a existência de peças sobressalentes para a substituição, caso não haja, inicia-se um processo de compra externa com fornecedores, o que demanda muito tempo e, nem sempre é viável interromper toda uma linha de produção para que seja realizado o reparo. Com isto, uma forma prática para prevenir imprevistos, que ocorrem, impreterivelmente, é o mapeamento dos equipamentos de alta criticidade na linha de produção, com o objetivo de se identificar equipamentos e peças de reposição a se ter em estoque.

No cenário de uma indústria, por exemplo, nota-se a existência de diversos tipos e tamanhos de motores e equipamentos, nos quais elementos como chavetas, pinos, anéis de retenção, entre outros, são usados para garantir sua fixação. Estes elementos fixadores também aparecem em grande quantidade e variedade. O grande número de itens exige a presença de um grande estoque, o que contribui para uma maior quantidade de itens estocados, gerando dinheiro fora de circulação.

Considerando os dados do estudo de caso, com engrenagem de 1" de espessura, área do furo de 1675mm², comprimento da chaveta de 50mm e espessura da película do adesivo de 0,4mm podemos calcular o custo aproximado para manutenção no caso estudado.

i) Para utilização de uma chaveta de 50 mm foi comprada uma vara de 1 metro, o que torna o preço unitário de R\$15,00 dividido por 20, resultando num custo de R\$ 0,75.

ii) Neste caso, pode ser utilizado um cortador de chavetas na operação de corte. Seu preço é de R\$ 160,00 e foi examinado que este realizará 1000 cortes antes de ser substituído, resultando num custo por chaveta de R\$ 0,16.

iii) Foi considerado para o cálculo de volume o produto entre a película do adesivo aplicado, perímetro do furo e espessura da engrenagem:

perímetro do furo: $\pi.d = 3,14 \times 21 = 65,94$ mm

película do adesivo: 0,4 m (Antônio G. de Magalhães, 2007).

espessura da engrenagem: 25,4 mm

O volume encontrado foi de 0,67 ml por aplicação de cola.

iv) O adesivo LOCTITE 422 possui preço de R\$ 64,00 (tubo de 50 ml), resultando em um custo/aplicação de R\$ 0,86. No caso da LOCTITE 660, o tubo de 50 ml custa R\$ 160,00, o que dá um custo/aplicação de R\$ 2,15. Já com o Araldite, vendido por R\$ 14,00 a embalagem de 16 gramas (14,5 ml), temos um custo/aplicação de R\$ 0,65. Foi incluído também o valor de um limpador de superfície, elemento indispensável na operação de colagem.

Tabela 4: Valores de mercado para chavetas

CHAVETA	Preço	Preço/ chaveta
Chaveta 6x6x1000mm	R\$ 15,00	R\$ 0,75
Cortador de chaveta	R\$ 160,00	R\$ 0,16
Total	R\$ 175,00	R\$ 0,91

Tabela 5: Valores de mercado para adesivos

ADESIVO	Preço	Preço/junta
LOCTITTE 422 50ml	R\$ 64,00	R\$ 0,86
LOCTITTE 660 50ml	R\$ 160,00	R\$ 2,15
Araldite 50 ml	R\$ 48,30	R\$ 0,65
Limpador de superficie	R\$ 16,00	R\$ 0,32

Uma comparação importante que deve ser feita em casos de manutenção é o tempo de atendimento para que o equipamento volte à operação. Havendo na fábrica tanto a chaveta apropriada quanto o cortado ou setor de ferramentaria, para que esta operação seja concluída,

alguns tempos devem ser levados em questão como: deslocamento até almoxarifado, encontro da chaveta apropriada, corte da chaveta e montagem do equipamento. Estas são atividades que podem demandar tempos variados e que dependem da organização e disposição de cada empresa. Até que o equipamento volte à operação pode-se levar uma média de quinze minutos a algumas horas, o que não se aplica, caso seja necessária uma compra, já que a operação de manutenção corretiva poderia exigir diversas horas.

Com a utilização de adesivos o processo de fixação é de 1 minuto com o adesivo 422, 60 minutos sem acelerador com o adesivo 660 e de 10 minutos para o Araldite. O problema de não haver a chaveta na fábrica seria minimizado ou serviria como paliativo até que chegasse a vara da chaveta apropriada.

Após a análise dos valores apresentados nas tabelas 4 e 5, conclui-se que, neste caso, o uso da chaveta, economicamente, é mais vantajoso. Mas se tratando de manutenção corretiva, onde a ação deve ser a mais rápida possível, é recomendado então o uso do Araldite.

4.4.2 Análise econômica em montagens com confecção de elementos

Nesta ocasião, um dos principais fatores a ser considerado é o custo do projeto, aliado ao tempo de fabricação e a um projeto que vise dar maior confiabilidade ao mecanismo. Foram analisados e comparados na situação do projeto de um novo sistema, o custo que o uso de chaveta e que o uso dos adesivos vão proporcionar.

Custos para projeto de eixos chavetados:

- i)** Na fabricação das peças consideram-se custos extras que não existiram em uma junta colada, como abertura de rasgo de chaveta no eixo e na engrenagem, que são considerados custos com o serviço sendo realizado internamente ou mesmo quando realizado por terceiros. A presença da chaveta também é um custo a mais, uma vez que a chaveta não é usada no projeto de juntas coladas.
- ii)** Foi comprada uma vara de chaveta de 1 metro, ao preço de R\$ 15,00, que foi dividida em 20, resultando um custo de R\$ 0,75 por chaveta.
- iii)** Se a empresa possuir ferramentaria, o preço de hora trabalhada do operador, que fará a abertura dos rasgos no eixo e na engrenagem, é de R\$ 9,25. Considerando o tempo para realização do serviço de uma hora e doze minutos, na plaina, o custo por chaveta será de R\$ 11,10. Além disso, um bit de aço rápido é usado para a abertura dos rasgos e este possui custo de R\$ 12,00, então, levando em conta que um mesmo bit pode gerar até 500 rasgos antes de ser

cortado, o custo por chaveta traz o valor de R\$ 0,02. Nesta avaliação foram desconsiderados os gastos com energia elétrica e o custo do fluido de corte.

iv) Sendo o serviço realizado externamente, os valores cobrados para realização dos rasgos na engrenagem e no eixo são, respectivamente, de R\$ 4,50 e R\$ 10,50.

v) O adesivo LOCTITE 422 possui preço de R\$ 64,00 (tubo de 50 ml), resultando em um custo/aplicação de R\$ 0,86. No caso da LOCTITE 660, o tubo de 50 ml custa R\$ 160,00, o que dá um custo/aplicação de R\$ 2,15. Já no Araldite, vendido por R\$ 14,00 a embalagem de 16 gramas (14,5 ml), temos um custo/aplicação de R\$ 0,65. Foi incluído também o valor de um limpador de superfície, elemento indispensável na operação de colagem.

Tabela 6: Custos de serviço para eixos chavetados

CHAVETA	Preço	Preço/ chaveta
Custo serviço interno		
Chaveta 6x6x1000mm	R\$ 15,00	R\$ 0,75
Hora homem ferramentaria	R\$ 9,25	R\$ 11,10
Bit aço rápido	R\$ 12,00	R\$ 0,02
Total	R\$ 36,25	R\$ 11,87
Custo serviço externo		
Rasgo de chaveta engrenagem	R\$ 4,50	R\$ 4,50
Rasgo de chaveta eixo	R\$ 10,50	R\$ 10,50
Chaveta 6x6x1000mm	R\$ 15,00	R\$ 0,75
Total	R\$ 30,00	R\$ 15,75

Tabela 7: Custo de serviço para colagem

ADESIVO	Preço	Preço/ junta
LOCTITTE 422 50ml	R\$ 64,00	R\$ 0,86
LOCTITTE 660 50ml	R\$ 160,00	R\$ 2,15
Araldite 50 ml	R\$ 48,30	R\$ 0,65
Limpador superfície	R\$ 16,00	R\$ 0,32

Após o estudo do caso e comparação dos valores apresentados nas tabelas 6 e 7, viu-se que o uso do adesivo neste caso é melhor, no que tange a economia, em relação ao uso de chaveta.

Capítulo 5

Análise experimental

Neste capítulo serão apresentadas todas as etapas de testes e objetivos finais do projeto, com o intuito de provar que o adesivo é uma alternativa para a manutenção e montagem de elemento de transmissão de torque, já que, as juntas coladas possuem vasta aplicabilidade em todos os equipamentos com elementos rotativos.

5.1 Objetivos

O objetivo desta etapa de testes é realizar a medição, em uma situação laboratorial, para obter os valores máximos de torque admissível para cada adesivo, assim como, o comportamento do adesivo ao longo da aplicação da força. Com esta etapa de testes, espera-se, portanto, encontrar adesivos com capacidades de resistência ao cisalhamento distintas, o que terá grande relevância para a seleção adequada do adesivo de acordo com a sua aplicação, ou seja, cada mecanismo terá seu respectivo adesivo, no que concerne ao torque a ser aplicado em cada situação. Buscamos uma alternativa de fixação de elementos de transmissão de torque, embora não desconsideremos as funções importantes de uma chaveta, que é, sobretudo, a de ser desmontável e falhar para proteger o eixo quando a força máxima admissível de trabalho for atingida.

5.2 Planejamento

Na realização da etapa de testes observou-se a necessidade de utilização de uma máquina que pudesse gerar gráficos que descrevessem o comportamento da amostra quando solicitada a uma carga, para tal, usou-se a máquina Instron 5966, no Laboratório de Compósitos e Adesivos (LADES), do Campus Maracanã do CEFET/RJ. Após conhecer o equipamento e realizar pré-testes com um torquímetro, foi possível projetar um dispositivo que se adequasse as dimensões e furações do equipamento. Foi também requerido o desenvolvimento de um gabarito que garantisse a estabilidade do eixo durante a cura da cola, formando um ângulo reto entre o dispositivo e o eixo além da distância mínima para que não ocorresse flexão do eixo durante a aplicação da carga.

Os testes foram realizados após a espera de tempo da cura das colas, isto é, 1 hora para LOCTITE 422, que é composta por cianoacrilato e 24 horas para Araldite e LOCTITE 660. A cola Araldite é composta pela mistura de um endurecedor e uma resina.

5.2.1 Pré-teste

Com o objetivo de se obter resultados preliminares, foram realizados testes utilizando uma engrenagem com diâmetro interno de 21 mm espessura de 25 mm, adesivo Araldite e um torquímetro Tramontina. Diante disto, foi possível obter uma previsão de torque e força necessários à ruptura do adesivo. Este teste não possui alta precisão, mas o torque necessário para quebrar o adesivo foi de 195 N.m .

5.3 Projeto do dispositivo

Foi necessário, para a realização da etapa de testes, o projeto de um dispositivo que se adequasse as dimensões da máquina Instron 5966, vide figura 16, que é usada comumente para ensaios de tração. As medidas consideradas a distância de 90 mm entre os furos da base do equipamento, onde poderia ser fixado o dispositivo, a altura do cilindro central da máquina, onde o eixo fixado ao dispositivo não poderia tocar, ou seja, a altura do eixo à base deveria ser maior do que 80 mm e a área disponível para o alojamento do dispositivo entre a lateral da máquina e o cilindro central é de 190 mm x 180 mm, portanto, foi definida área da base do dispositivo com as medidas de 165 mm x 165 mm.

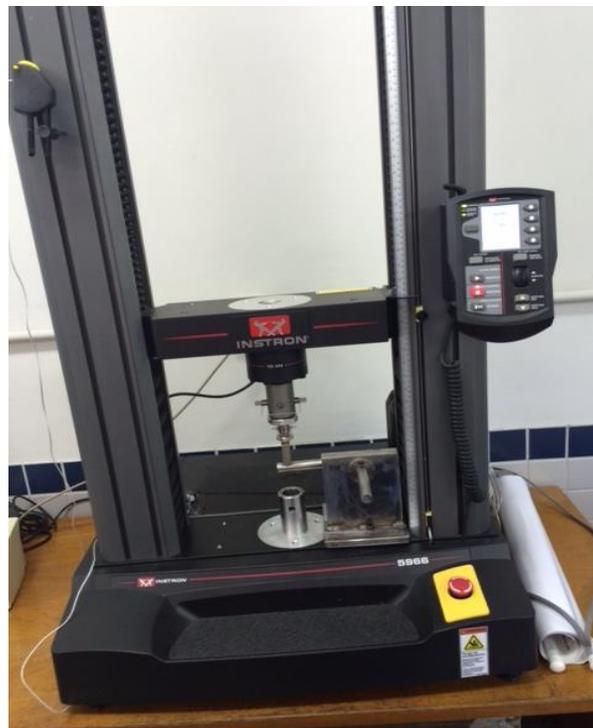


Figura 16: Máquina Instron 5966



Figura 17: Dispositivo posicionado na máquina

Para realizar o projeto do dispositivo, além de considerar as dimensões do equipamento, para que este não fosse danificado fizeram-se restrições quanto ao uso. Uma das restrições foi que o dispositivo deveria ter em sua base material macio, outra era que os parafusos de fixação no equipamento não poderiam ser solicitados a uma força de aperto que chegasse a danificar a rosca do furo da base da máquina. A figura 17 mostra o dispositivo posicionado na máquina.

A partir destas restrições foi projetado o dispositivo, onde a distância vertical entre o cilindro central e o eixo do dispositivo foi de 50 mm. Na parte inferior do dispositivo, que entra em contato com o equipamento, foi colado uma junta de Tealon de 1 mm de espessura. O dispositivo foi projetado de forma que não fosse realizada uma elevada força de aperto e, devido a isto, o dispositivo foi projetado de forma robusta, no intuito de que o peso do dispositivo resistisse juntamente com o parafuso, para impedir que houvesse o tombamento durante a aplicação da força, com isto foi observado que não haveria inclinação até uma força de 75N sem a utilização dos parafusos.

O corpo do dispositivo foi definido com o dimensionamento de 1" de espessura para simular o estudo de caso apresentado no início deste trabalho, que é simular a colagem de uma engrenagem de 1" de espessura e 21 de diâmetro interno. A fixação do flange ao corpo do dispositivo é feita com a utilização de 4 parafusos 3/16" e tem por função resistir ao torque aplicado sobre o conjunto. Segue abaixo cálculo do número de parafusos necessário.

5.3.1 Número mínimo de parafusos no flange para resistir ao torque

Considerando:

Utilizando a tensão de cisalhamento de 120MPa;

Diâmetro do parafuso = 4,76mm;

Força máxima a ser aplicada de 8000N, valor próximo ao limite máximo da célula de carga equipamento

$$\sigma_s = 120MPa$$

$$A = \pi r^2 = 17,814\text{mm}^2 \text{ de um parafuso}$$

$$\sigma_{méd} = \frac{F}{A}$$

$$120 \times 10^6 = \frac{8000}{N \times 1,8 \times 10^{-5}}$$

$$N = 3,7 \text{ parafusos}$$

Foram utilizados 4 parafusos para realizar a fixação.

5.3.2 Análise de tensão de flexão e torção no ponto crítico

No projeto do dispositivo foram consideradas as tensões de torção e flexão presentes no engaste fixado por cola, sendo estas tensões calculadas no ponto crítico da junta, usando o critério de Von Mises, que é representada pelas equações 9, 10 e 11, onde T_{eq} representa a tensão equivalente, σ_x é a tensão de flexão normal, e τ_{xy} é a tensão de cisalhamento.

$$T_{eq} = \sqrt{\sigma_x^2 + 3\tau_{xy}^2} < S_y, \quad (9) \text{ onde:}$$

$$\sigma_x = \frac{(d.F).R}{\frac{\pi R^4}{4}} \quad (10)$$

$$\tau_{xy} = \frac{(L.F).R}{\frac{\pi R^4}{2}} \quad (11)$$

Substituindo valores:

$$\sigma_x = \frac{(0,02 \cdot 1500) \cdot 0,014}{\pi \cdot 0,01^4} = 38,2 \text{ MPa}$$

$$\tau_{xy} = \frac{(0,13 \cdot 1500) \cdot 0,012}{\pi \cdot 0,01^4} = 124,1 \text{ MPa}$$

$$T_{eq} = \sqrt{(38,2)^2 + 3 \cdot (124,1)^2} = 218,11 \text{ MPa}$$

A força de 1500 N foi selecionada porque foi oriunda da divisão entre o torque de 195 N.m, encontrado no pré-teste e o comprimento do braço de alavanca de 130 mm, $F = T/d$.

Sabendo que o limite de escoamento do aço 1020 é de 210 MPa, conclui-se que a força máxima que pode ser feita no eixo do dispositivo é um pouco abaixo de 1500 N, se essa força for de 1500 N ou superior o eixo começará a se deformar plasticamente.

5.3.3 Gabarito para cura da cola

Durante a operação de colagem ocorreu uma dificuldade de posicionar e manter o elemento fixado durante o intervalo de tempo até a cura, portanto, no intuito de solucionar este problema foi confeccionado um gabarito de altura, que garantisse um ângulo reto entre o eixo e a base, ao mesmo tempo uma distância longitudinal mínima entre o eixo e a parte vertical do dispositivo, soldada à base. A figura 18 ilustra o gabarito posicionado durante a cura da cola.

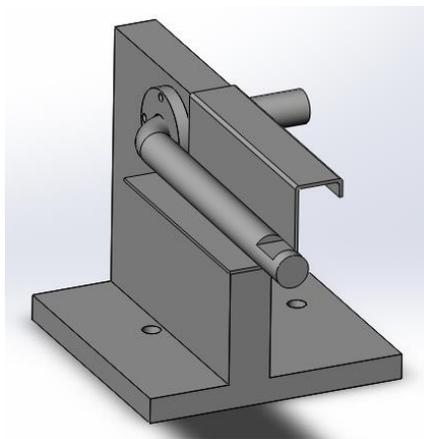


Figura 18: Ilustração do gabarito

O gabarito de altura é encaixado no próprio dispositivo, com isto garantimos o paralelismo com o dispositivo. No anexo E segue os desenhos detalhados do dispositivo.

5.4 Processo de colagem

O processo é iniciado com a etapa de limpeza da superfície, que é realizada com pano limpo umedecido de álcool ou acetona. Tanto o furo quanto o eixo devem estar livres de impurezas como gorduras, graxas ou resíduos de adesivos providos de testes anteriores.

Após a limpeza da superfície, o adesivo é aplicado tanto no furo quanto no eixo e, em seguida, o eixo é posicionado no furo e apoiado no gabarito.

5.5 Etapa de teste

Depois de passado o processo de cura, foi fixado o dispositivo no equipamento, por meio de dois parafusos de 5/16". Em seguida, aproximou-se o punção da máquina ao eixo, com a máquina calibrada, de modo que a posição do punção próxima ao eixo seja considerada como inicial.

Na próxima etapa, o programa de simulação foi iniciado no computador conectado a máquina. No software, é possível estabelecer o tipo de ensaio e velocidade de aplicação da força, onde foi selecionado um ensaio de compressão, no qual se determinou que a intensidade da força variasse 5 N a cada um segundo. A figura 19 ilustra o dispositivo posicionado para a realização do teste.

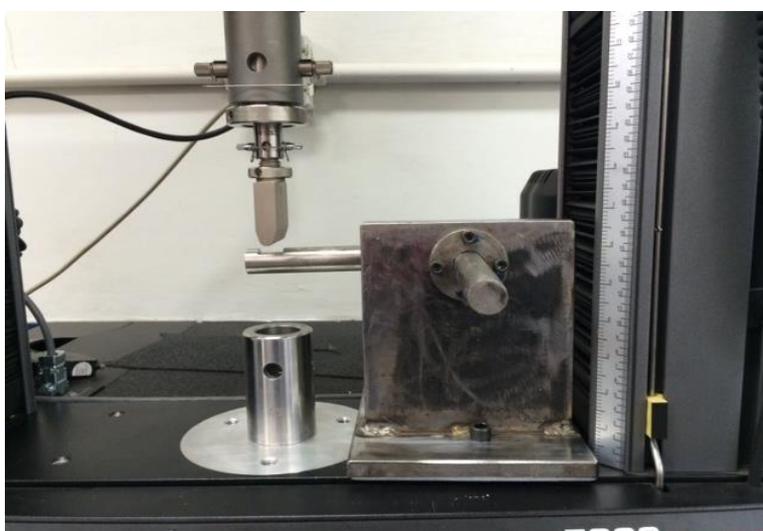


Figura 19: Dispositivo posicionado para realização do teste

5.6 Resultados

Os resultados obtidos na etapa de testes foram satisfatórios, visto que, a cola LOCTITE 422 apresentou capacidade de resistir a um torque de até 65 N.m. A engrenagem estudada atua com um limite operacional de torque de 50 N.m, portanto a substituição da chaveta, que fixa tal engrenagem, pelo adesivo seria viável. A cola também mostrou um comportamento interessante ao resistir as cargas próximas ao seu limite máximo, mesmo após a sua ruptura.

Tal comportamento tem a vantagem de demonstrar sinais de falha com perda da transmissão de torque, ao invés de instantaneamente pararem de transmitir torque, fato que ocorre na chaveta, após cisalhada. A seguir é possível conferir mais detalhadamente esses resultados, através dos gráficos.

- **Loctite 422** - Apresentou alta resistência ao cisalhamento, rompeu com a aplicação aproximada de 500N de força. Resistiu por um longo tempo à determinada força, mesmo após sua ruptura, com o tempo de fixação inferior à que 15 minutos, sendo testado com uma hora de cura. É um adesivo bem viscoso, mas de fixação quase instantânea, e é necessária rápida aplicação, pois obtém cura assim que entra em contato com a umidade.

$$T = F \times D$$

$$T = 500 \times 0.130$$

$$T = 65 \text{ N.m}$$

$$\text{Força na área colada} = T/d$$

$$F = 65/0,01$$

$$F = 65\text{kN}$$

$$\sigma_s = \frac{F}{A}$$

$$\sigma_s = \frac{65000}{1675}$$

$$\sigma_s = 38,80 \frac{N}{mm^2}$$

O Loctite demonstrou ter a aplicação mais fácil. A figura 20 traz o gráfico resultante do teste com o adesivo Loctite 422.

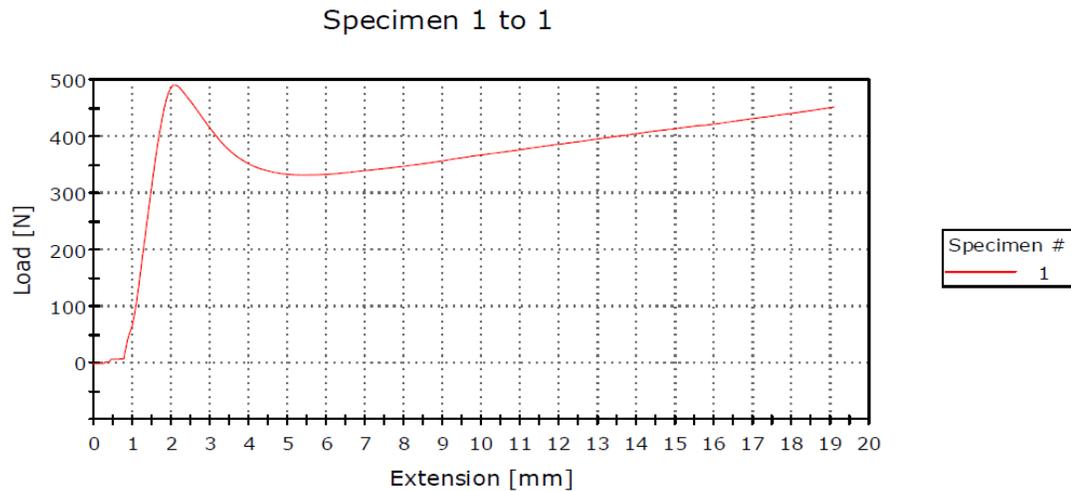


Figura 20: Gráfico resultante do teste da Loctite 422

- **Araldite Hobby** - Apresentou boa resistência ao cisalhamento, já que rompeu com cerca de 400 N de força; também apresentou a capacidade de resistir a uma quantia de força próxima ao seu limite máximo, mesmo após a ruptura. A aplicação dessa cola requer o uso de instrumentos auxiliares, como seringa ou espátula. Foram realizados três testes consecutivos sem a desmontagem do dispositivo, com o aumento da velocidade de descida do punção, para acompanhar a capacidade de resistir ao cisalhamento mesmo após sua ruptura. A figura 21 mostra o resultado do teste com a Araldite.

$$T = F \times D$$

$$T = 400 \times 0.130$$

$$T = 52 \text{ N.m}$$

$$F = \frac{T}{d}$$

$$F = \frac{52}{0,01}$$

$$F = 52 \text{ kN}$$

$$\sigma_s = \frac{F}{A}$$

$$\sigma_s = \frac{52000}{1675}$$

$$\sigma_s = 31,04 \frac{N}{mm^2}$$

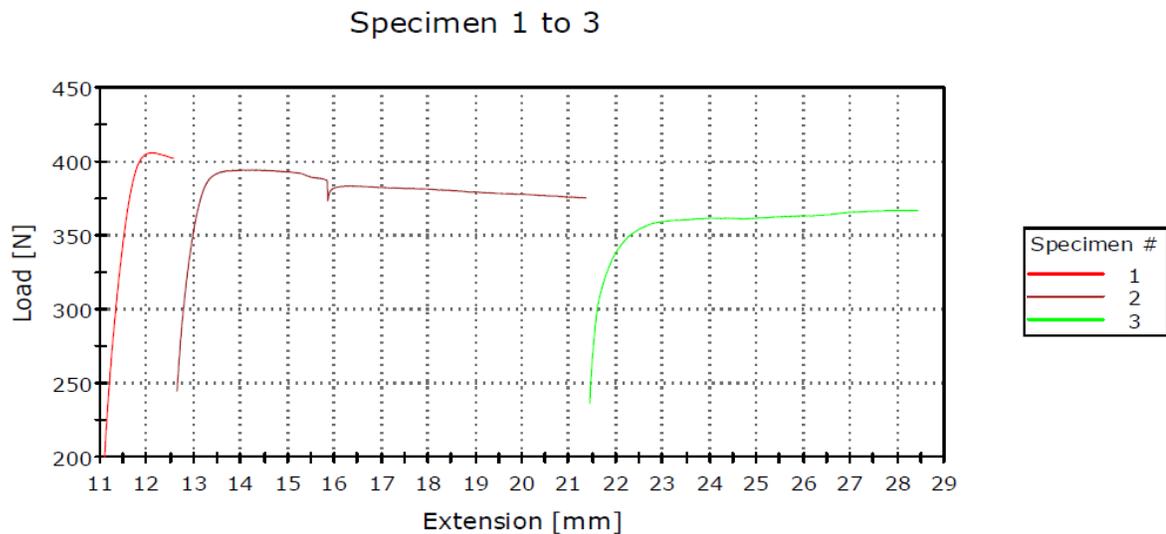


Figura 21: Gráfico resultante do teste da Araldite Hobby

- Loctite 660** - Este adesivo não apresentou o resultado esperado quanto à resistência ao cisalhamento, mesmo após o período de 24 horas de cura recomendado pelo fabricante. Foi verificado, posteriormente à desmontagem, que o adesivo, que é anaeróbico, não havia completado sua cura. Concluiu-se então que, houve presença de ar durante o processo de cura, e tal fato pode ser corrigido com a diminuição da folga entre eixo e furo, que atualmente é de dois décimos de milímetro. A figura 22 ilustra o resultado do teste com a cola Loctite 660.

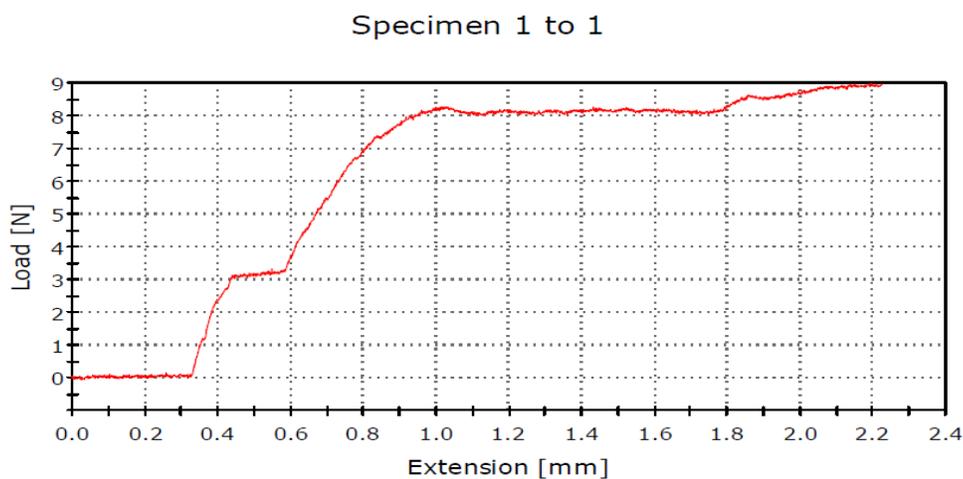


Figura 22: Gráfico resultante do teste da Loctite 660

5.7 Trabalhos futuros

Faz-se necessário o prosseguimento dos estudos, no que tange aos adesivos como possibilidade de substituição a elementos fixadores, responsáveis pela transmissão de torque, afinal, prosseguir com novos testes, como os realizados neste trabalho, é fundamental para verificar a repetibilidade e qualidade da proposta, o que teria muita relevância, sobretudo em testes de fadiga do adesivo.

Os gráficos apresentados neste estudo poderiam expressar no eixo Y força e no eixo X ângulo, já que, para cada milímetro percorrido pelo punção representa $0,692^\circ$, com isto seria de maior compreensão o gráfico para outras análises e melhor interpretação do gráfico. O arquivo gerado pelo programa do equipamento Instron não possibilitou transportar os dados para o Excel com facilidade.

Capítulo 6

Conclusão

Atualmente, a competição mercadológica exige cada vez mais dos profissionais, em suas respectivas áreas. Uma das principais funções do engenheiro mecânico é encontrar soluções que viabilizem a redução de custos sem perdas na qualidade dos projetos. A análise realizada neste projeto foi a de, muito especialmente, minimizar desperdícios de tempo, fabricação e manutenção. O presente trabalho realizou a análise da aplicação de juntas coladas para transmissão de torque, ao avaliar os resultados e fatos apresentados, pode-se concluir que os adesivos podem ser uma opção para a transmissão de torque, podendo substituir chavetas em alguns casos. Vale ressaltar o comportamento apresentado pelo adesivo após sua ruptura, afinal, foi possível continuar transmitindo torque, ainda que com perdas.

Tal fato é relevante para uma linha de produção, pois, o equipamento antes de perder totalmente sua finalidade indicaria sinais de falha, ao invés de romper de forma imprevisível. O adesivo romperá caso a força atinja o limite superior de carga de trabalho, assim como, a chaveta, permitindo que o eixo gire sem transmitir torque total para o restante do mecanismo. O dispositivo confeccionado pode ser utilizado para realizar testes para eixos com outros diâmetros, dependendo, apenas, da fabricação do flange com outro diâmetro interno.

Conquanto, o objetivo desta análise foi atingido, provando, assim, que é viável a aplicação de juntas coladas para transmissão de torque, onde o Loctitte 422, dentre os adesivos testados, foi o que apresentou melhor resultado, resistindo a um torque de 68 N.m contra 52 N.m do Araldite. Também apresentou o melhor custo benefício, apesar de custar R\$ 0,12 a mais do que o Araldite, o Loctitte 422 apresenta menor tempo de cura e fácil aplicação. Por estes motivos é recomendada a utilização do Loctitte 422 para a transmissão de torque respeitando os limites e capacidade do adesivo.

Referências Bibliográficas

Adhesives.org; Adhesive Bonding; Disponível em: <<http://www.adhesives.org/adhesives-sealants/fastening-bonding/fastening-overview/adhesive-bonding>>; Acessado em 18/04/2014.

BRAFIX; Disponível em: <<http://www.brafix.com.br>>; Acessado em 20/10/2014.

Elastim Maborim; Disponível em: <<http://www.elastim.com.br>>; Acessado em 20/10/2014

ELEMAQ II; Disponível em: <<http://www.trabalhosfeitos.com/ensaios/elemaq-ii-chavetas>>; Acessado em 15/03/2014

Fundamentos do Projeto de Componentes de Máquinas; *Robert C. Juvinall*; LTC, 2008.

Henkel; Disponível em: <<http://www.henkel.com>>; Acessado em 15/10/2014.

Indústrias de Processos Químicos; *Shreve, Randolph Norris e Jr, Joseph A. Brink*; 4ª Ed; Rio de Janeiro: Guanabara Koogam, 2008.

Instron; Disponível em: <<http://www.instron.com>>; Acessado em 14/10/2014

Juntas Adesivas Estruturais; *Antônio G. de Magalhães, Lucas Filipe Martins Silva*; Publindústria, 2007

NEI; Disponível em: <<http://www.nei.com.br>>; Acessado em 17/10/2014

Projeto de Engenharia Mecânica; *Joseph E. Shigley*; BOOKMAN; 7ª edição, 2005.

Projeto de Máquinas - Uma Abordagem Integrada; *Robert L. Norton*; 4ª Ed.; BOOKMAN, 2013.

Projeto Mecânico de Elemento de Máquinas; *Jack A. Collins-Ed*; LTC, 2006.

RENOMA; Disponível em: <<http://www.renoma.com.br>>; Acessado em 21/10/14

Torque transmission capabilities of adhesively bonded tubular lap joints for composite drive shafts; Won Tae Kim, Dai Gil Lee; 1995 Published by Elsevier Ltd

ANEXOS

ANEXO A: Loctite 422



Folha de Dados Técnicos

Loctite 422

Henkel Loctite Adesivos Ltda
 Av. Prof. Vernon Kriebler, 91
 08690-111 - Itapevi
 São Paulo - Brasil
 Fone: 55-11-4143-7000

DESCRIÇÃO DO PRODUTO

O produto Loctite® 422 é um adesivo de cianoacrilato, monocomponente, formulado especificamente para aplicações que requerem alta viscosidade e tempo de fixação lento.

APLICAÇÕES TÍPICAS

Adere uma ampla variedade de metais, plásticos ou borracha. Particularmente indicado para aderir materiais rugosos e com superfície irregular e, para aplicações que necessitam de tempo de alinhamento até 15 segundos.

NORMA MILITAR

Super Bonder 422 está de acordo com:
 MIL-A-46050C Tipo II, classe III

PROPRIEDADES DO MATERIAL NÃO-CURADO

	Valor	Típicos	Faixa
Tipo químico:	Etil cianoacrilato		
Aparência:	Líquido Incolor		
Densidade @ 25°C	1,05		
Viscosidade @ 25°C, mPa.s (cP)			
Brookfield LVF			
haste 2 @ 6 rpm	2750		2000 a 3500
Ponto de fulgor (TCC), °C	>80		

DESEMPENHO TÍPICO DE CURA

Sob condições normais, a umidade da superfície inicia o processo de endurecimento. Embora resistência funcional plena seja obtida em período relativamente curto, a cura prossegue por no mínimo 24 horas antes de produzir resistência plena a produtos químicos/solventes.

Velocidade de cura vs. substrato

A velocidade de cura vai depender do substrato usado. A tabela abaixo mostra o Tempo de Fixação obtido para diferentes materiais a 22°C e 50% de umidade relativa. Isto é definido como o tempo para adquirir resistência ao cisalhamento de 0,1 N/mm² (14,5 psi) testada em amostras segundo a ASTM-D1002.

Substrato	Tempo de Fixação, segundos
Aço (desengordurado)	35
Alumínio	20
Dicromato de zinco	70
Neoprene	<5
Borracha nitrílica	<5
ABS	30
PVC	35
Polícarbonato	50
Materiais fenólicos	25

Velocidade de cura vs. folga entre as partes

A velocidade de cura vai depender da folga entre as partes. Altas velocidades de cura são favorecidas por pequenas folgas. Aumentando-se a folga, reduz-se a velocidade de cura.

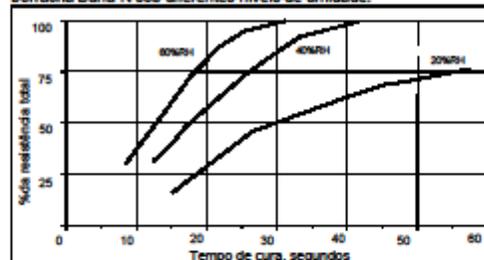
Velocidade de cura vs. ativador

Quando o tempo de cura é inaceitavelmente longo, devido à presença de grandes folgas ou baixa umidade relativa, a aplicação de um ativador na superfície vai acelerar a velocidade de cura. Entretanto, isto pode

reduzir a resistência final da adesão, razão pela qual recomendamos a realização de testes para confirmação do efeito obtido.

Velocidade de cura vs. umidade

A velocidade de cura vai depender da umidade relativa do ambiente. O gráfico abaixo mostra a carga de ruptura evoluindo com o tempo em borracha Buna-N sob diferentes níveis de umidade.



PROPRIEDADES TÍPICAS DO MATERIAL CURADO

Propriedades Físicas

Coefficiente de dilatação térmica, ASTM-D696, K ⁻¹	100 x 10 ⁻⁶
Coefficiente de condutividade térmica, ASTM-C177, W.m ⁻¹ K ⁻¹	0,1
Temperatura de transição vítrea, ASTM-E228, °C	165

Propriedades Elétricas

Constante e perda dielétricas, 25°C, ASTM-D150	Constante	Perda
@ 100 Hz	2,3	<0,02
@ 1 kHz	2,3	<0,02
@ 10 kHz	2,3	<0,02
Resistividade volumétrica, ASTM-D257, Ω.cm		1 x 10 ¹⁶
Resistividade superficial, ASTM-D257, Ω		4 x 10 ¹⁶
Tensão dielétrica, ASTM-D149, kV/mm		25

DESEMPENHO DO MATERIAL CURADO

(Após 24 h a 22°C)

	Valor
Resistência ao cisalhamento, ASTM-D1002, DIN-53283	
Aço jateado, N/mm ²	22
(psi)	(3.200)
Alumínio apassivado, N/mm ²	15
(psi)	(2200)
Dicromato de zinco, N/mm ²	7
(psi)	(1000)
ABS, N/mm ²	6
(psi)	(850)
PVC, N/mm ²	6
(psi)	(850)
Polícarbonato, N/mm ²	5
(psi)	(700)
Fenólicas, N/mm ²	10
(psi)	(145)
Borracha de neoprene, N/mm ²	10
(psi)	(145)

NÃO SERVE PARA ESPECIFICAÇÕES DE PRODUTO.
 OS DADOS TÉCNICOS CONTIDOS NA PRESENTE DESTINAM-SE A SIMPLES REFERÊNCIA.
 PEDIMOS CONTACTAR O DEPARTAMENTO DE QUALIDADE DA LOCTITE PARA
 ASSISTÊNCIA E RECOMENDAÇÕES A RESPEITO DE ESPECIFICAÇÕES DESTES PRODUTOS.

ANEXO B: Loctite 660

Folha de Dados Técnicos

LOCTITE

LOCTITE® 660™

Dezembro 2009

DESCRIÇÃO DO PRODUTO

LOCTITE® 660™ apresenta as seguintes características:

Tecnologia	Acrílico
Base Química	Uretano metacrilato
Aparência (não curado)	Pasta cinza metálica ⁴⁸⁸
Fluorescência	Não
Componentes	Mono componente - não requer mistura
Viscosidade	Alta
Cura	Anaeróbico
Cura Secundária	Ativador
Aplicação	Fixação
Resistência	Alta

LOCTITE® 660™ é indicado para fixação de componentes cilíndricos, principalmente onde as folgas podem atingir até 0,50 mm (0.02 in.). O produto cura quando confinado entre superfícies metálicas e na ausência de ar, e evita o afrouxamento e vazamento originados por impacto e vibração. Este produto possui excelentes propriedades de cura em folgas. Indicado para a restaurar o ajuste de montagem sobre eixos desgastados, rolamentos frouxos e chavetas danificadas.

NSF Internacional

Registrado na NSF Categoria P1 para uso como vedante onde não existe a possibilidade de contato com alimentos em áreas de processamento de alimentos e próximo ao processamento. Nota: Esta é uma aprovação regional. Por favor, contacte o Centro de Engenharia Loctite para mais informações e esclarecimentos.

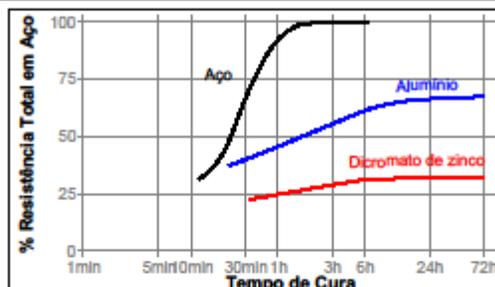
PROPRIEDADES DO MATERIAL NÃO CURADO

Densidade @ 25 °C	1,13
Ponto de Fulgor - Ver FISPQ	
Viscosidade Brookfield - HBT, 25 °C, mPa·s (cP):	
Haste TB, veloc. 0,5 rpm, Hellpath	1 000 000 a 2 000 000 ⁴⁸⁸
Haste TB, veloc. 5,0 rpm, Hellpath	150 000 a 350 000 ⁴⁸⁸

DESEMPENHO DE CURA

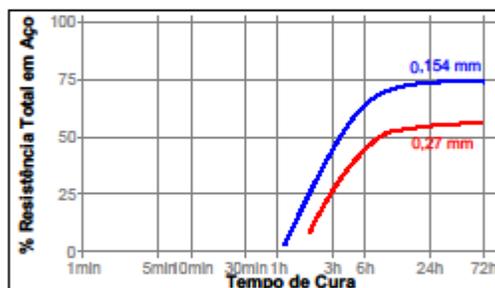
Velocidade de cura vs. Substrato

A velocidade de cura depende do substrato usado. O gráfico abaixo mostra a resistência à quebra desenvolvida em função do tempo em pinos e colares de aço comparado com diferentes materiais e testado de acordo com to ISO 10123.



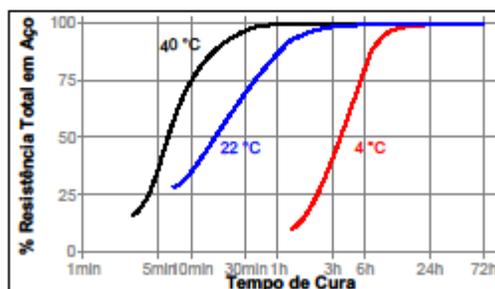
Velocidade de cura vs. Folga

A velocidade de cura depende da folga entre as partes. O gráfico seguinte mostra a resistência axial do produto em função do tempo em pinos e colares de aço em diferentes folgas controladas e testados de acordo com ISO 10123.



Velocidade de cura vs. Temperatura

A velocidade de cura depende da temperatura. O gráfico abaixo mostra a resistência ao cisalhamento paralelo desenvolvida em função do tempo e temperatura de exposição em pinos e colares de aço e testadas de acordo com ISO 10123.



Henkel

ANEXO C: Araldite



Boletim Técnico

Emissão: Janeiro de 2001
Revisão 01: 11-08-2005

ARALDITE HOBBY

Adesivo a base de resina epóxi.

DESCRIÇÃO DO PRODUTO

ARALDITE HOBBY é um adesivo epóxi, bicomponente utilizado para pequenas colagens e reparos, para a colagem dos mais variados materiais. Isento de solventes, endurece a temperatura ambiente ou a quente.

APLICAÇÕES TÍPICAS

No uso profissional e doméstico é indicado para colar pequenas superfícies de materiais lisos, porosos ou irregulares como azulejos, madeira, vidro, concreto, borracha vulcanizada, fibras naturais, pedras, metais, a maioria dos plásticos rígidos (exceção polietileno, polipropileno, nylon) e outros materiais.

INSTRUÇÕES PARA APLICAÇÃO

1. Antes de aplicar o ARALDITE HOBBY, limpar as superfícies deixando-as isentas de gordura, poeira, oxidação e tintas remanescentes.
2. Colocar na base que acompanha a embalagem ou recipiente, partes iguais das duas bisnagas. Misturar até obter uma pasta homogênea. **ATENÇÃO:** Utilizar a mistura no máximo em 5 minutos.
3. Aplicar uma camada fina da mistura sobre as duas partes a serem coladas. Juntar pressionando até a completa secagem (se necessário fixar com fita adesiva ou similar).

Da Mistura	
<i>Composição química:</i> Resina epóxi e poliaminoamidas	
<i>Relação de mistura:</i>	1:1
<i>Dureza, Shore "A":</i>	90
<i>Tempo de Manuseio:</i>	Aprox. 5 minutos
<i>Tempo de Secagem (25°C)</i>	10 minutos
<i>Tempo de cura total:</i>	Aprox. 8 horas
<i>Resistência Temperatura:</i>	70°C
<i>Rendimento(g/m²)</i>	300
<i>VALIDADE:</i> 24 meses, desde que armazenado em local seco e arejado.	

ANEXO D: Instron 5966



The difference is measurable.

5960 Series | Dual Column Tabletop

5960 Dual Column Tabletop Model testing systems can be used over a range of force applications up to 50 kN (11,250 lb, 5000 kg). A variety of load cells are available to provide accurate measurements for applications ranging from micron-size fibers to those utilizing the full capacity of the load frame. Additionally, a full range of grips, fixtures, and strain measurement devices are also available. In combination with Instron® Bluehill® Software, these testing systems provide high performance, flexibility, accuracy, and usability. Applications solutions include plastics, metals, rubber materials, automotive components, composites, adhesives, non-ambient temperature applications, and many more.

Features

- Productivity Panel with Live Display, Soft keys and Specimen Protect for enhanced usability and productivity
- High-stiffness and precision alignment from precision guidance and pre-loaded bearings for more accurate results
- Industry standard Ethernet interface to the computer for fast, reliable communication with laptop or desktop PC
- All digital electronics for reliability, durability, and measurement accuracy
- Meets or exceeds requirements of all national and international standards for materials testing systems

What's New

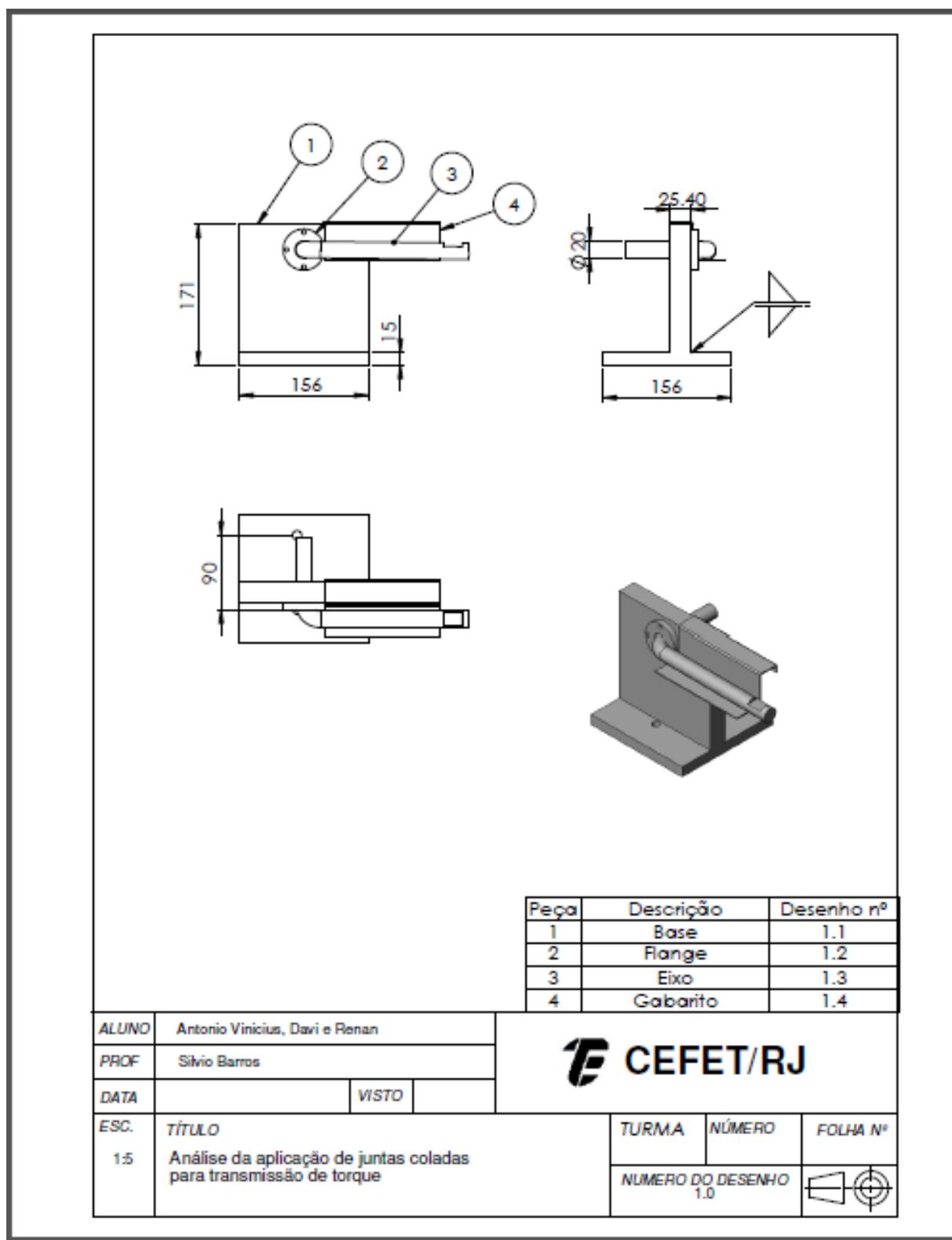
- Improved load accuracy range
- Increased data rate
- Improved speed accuracy
- Quick mount load cell kit (optional)
- Wider speed range
- Faster return speed for productivity
- Integrated Ethernet interface
- Up to four transducer control channels can be integrated to the base electronics

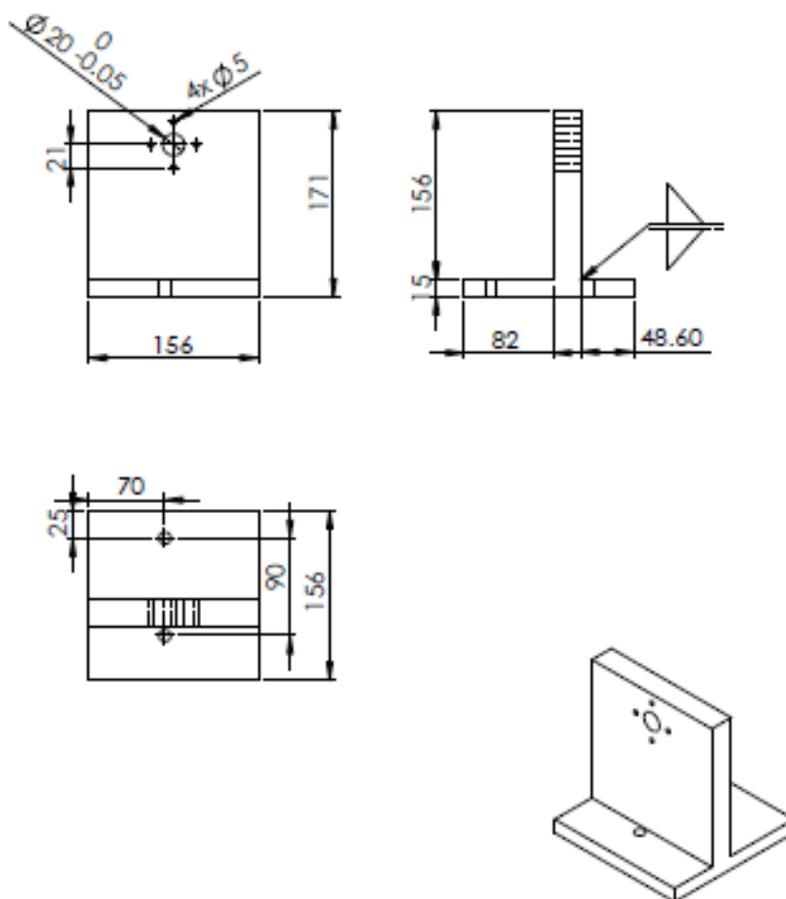
Accessories

- Grip Control for increased productivity with pneumatic grips
- Test Cam for video recording
- T-slot Table for mounting components
- Test Area lighting for working with small specimens
- Range of load cells for all applications
- Grips and test fixtures to meet testing standards
- Software for test control, data acquisition, and reporting

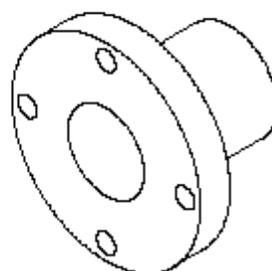
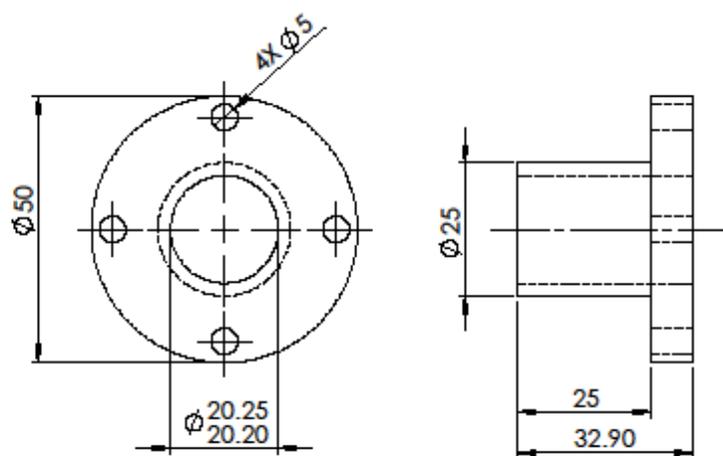


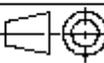
ANEXO E: Desenhos do projeto do dispositivo

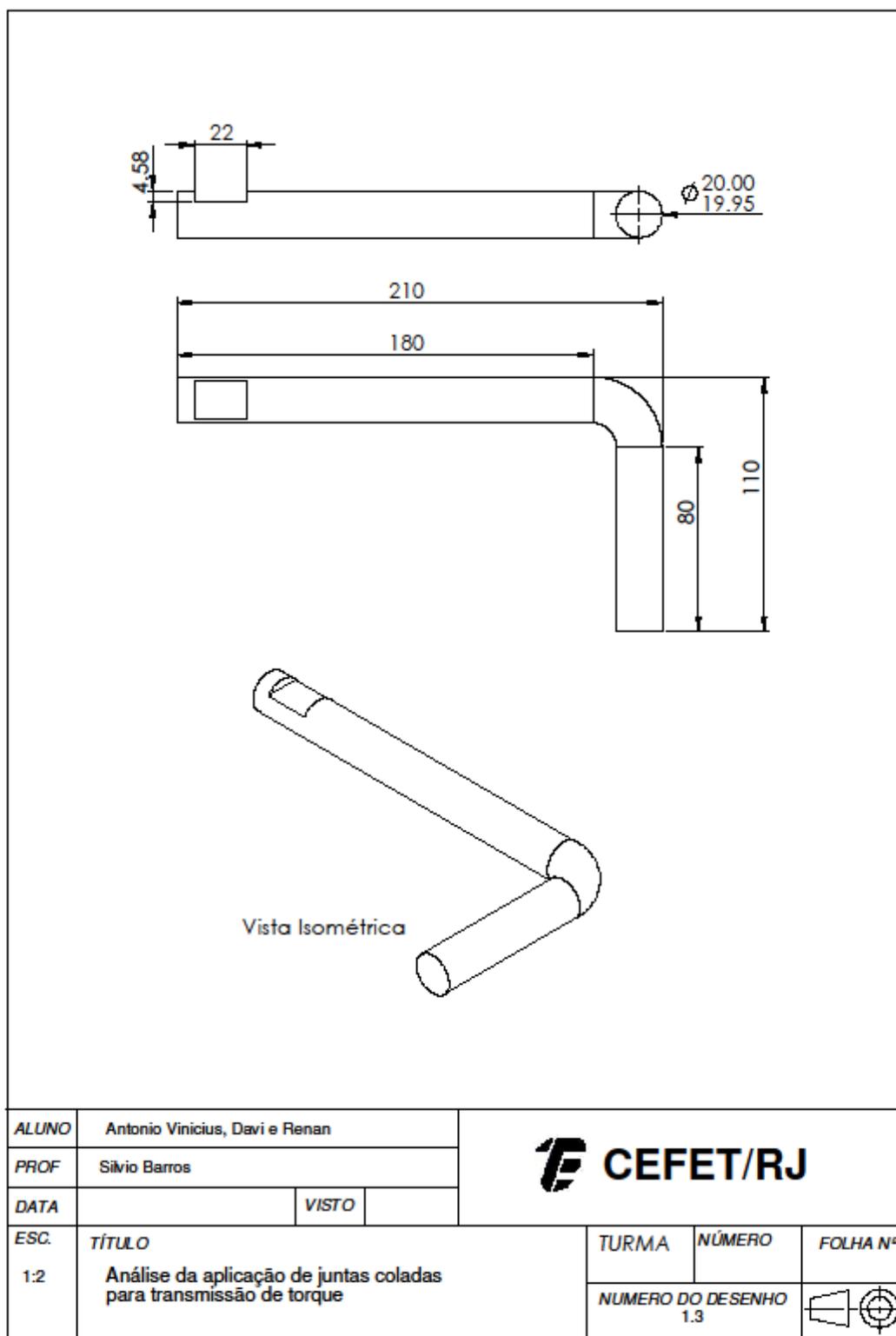


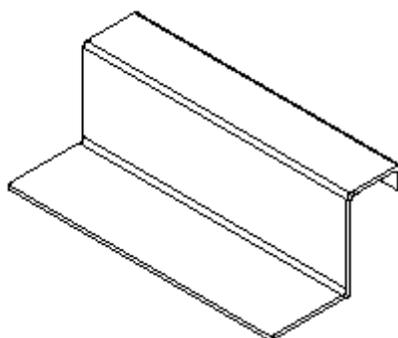
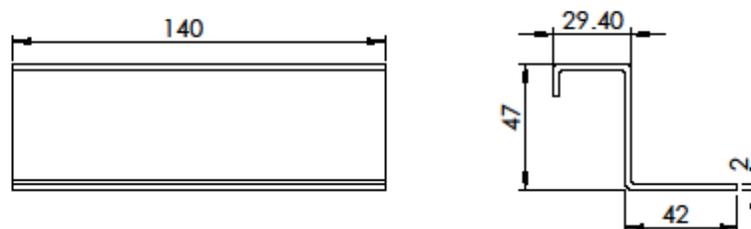


ALUNO	Antonio Vinicius, Davi e Renan			 CEFET/RJ		
PROF	Sílvio Barros					
DATA		VISTO				
ESC.	TÍTULO			TURMA	NÚMERO	FOLHA Nº
1:5	Análise da aplicação de juntas coladas para transmissão de torque			NÚMERO DO DESENHO 1.1		



ALUNO	Antonio Vinicius, Davi e Renan				
PROF	Silvio Barros				
DATA		VISTO			
ESC.	TÍTULO	TURMA	NÚMERO	FOLHA Nº	
1:1	Análise da aplicação de juntas coladas para transmissão de torque			NUMERO DO DESENHO 1.2	





ALUNO	Antonio Vinicius, Davi e Renan				
PROF	Sílvio Barros				
DATA		<i>VISTO</i>			
ESC.	TÍTULO	TURMA	NÚMERO	FOLHA Nº	
1:2	Análise da aplicação de juntas coladas para transmissão de torque			NUMERO DO DESENHO 1.4	

