

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

Influência de Queima de Retífica na Durabilidade de Juntas Homocinéticas

por

Leonardo Guilherme Herrmann

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

Porto Alegre, Julho de 2017



Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Escola de Engenharia  
Departamento de Engenharia Mecânica

Influência de Queima de Retífica na Durabilidade de Juntas Homocinéticas

por

Leonardo Guilherme Herrmann

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

Prof. Thamy Cristina Hayashi  
Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. José Antonio Esmerio Mazzaferro

Comissão de Avaliação:

Prof. Arnaldo Ruben Gonzalez

Prof. Ney Francisco Ferreira

Prof. Patric Daniel Neis

Porto Alegre, Julho de 2017

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Reinaldo e Eliane Herrmann, meu irmão, Renato Herrmann e à minha namorada, Laura Xavier, por todo o apoio que me possibilitou a conclusão do curso de Engenharia Mecânica, sempre tendo em mente que o estudo, a instrução e o trabalho são os únicos caminhos para uma carreira de sucesso.

Agradeço aos meus colegas de GKN, da Engenharia Experimental e da Engenharia de Produto, por me proporcionarem a visão da engenharia na prática.

Agradeço aos meus amigos por me proporcionarem momentos de descontração em uma jornada trabalhosa que é a formação em Engenharia Mecânica.

Herrmann, L. G. **Influência de Queima de Retífica na Durabilidade de Juntas Homocinéticas**. 2017. 16p. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

## **RESUMO**

O semieixo homocinético é responsável pela transmissão do torque e rotação da caixa de câmbio para as rodas, sua falha pode causar acidentes graves e, por esse motivo, a fabricação deve garantir que os defeitos provenientes dos processos de usinagem envolvidos em sua manufatura sejam minimizados. Devemos também conhecer consequências e influências desses defeitos no funcionamento da junta. O processo de retífica utilizado na fabricação das juntas pode acarretar um defeito conhecido como queima de retífica. Geralmente ocorre em situações em que a refrigeração durante o processo não é efetiva e o calor transmitido para a peça é elevado. A consequência desse defeito é a redução da dureza superficial e subsuperficial da peça. Considerando que a falha esperada para uma junta homocinética seja a formação de pites por fadiga superficial, a redução na dureza na região de contato dos componentes tem uma influência negativa na vida útil da junta. Uma falha prematura pode acarretar ruído, vibração e até levar à falha catastrófica do semieixo. Nesse trabalho foi utilizada a teoria de Macielinski para o cálculo da vida útil da junta homocinética e conduzido um teste de durabilidade para confirmar o desempenho reduzido da junta defeituosa.

**PALAVRAS-CHAVE:** durabilidade, queima de retífica, junta homocinética

Herrmann, L. G. **Grinding burn influence on service life of homokinetic joints**. 2017. 16p Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

## **ABSTRACT**

The homokinetic halfshaft is responsible for the transmission of torque and rotation from the gearbox to the wheels and its failure can lead to accidents and, for that reason, its manufacturing must ensure that any defects originated from the machining processes involved in its fabrication be minimized. It is important that the influences and consequences that those defects cause on the utilization of the joint are known. The grinding process utilized in the manufacturing of the joints can cause a defect known as grinding burn. Usually happens when the cooling applied in the process is not effective and the heat transferred to the part is elevated. The consequence of that defect is the reduction of surface and subsurface hardness. Considering that the expected failure in a homokinetic joint is the formation of pits by superficial fatigue, the reduction in surface hardness in the contact region of its internal components has a negative effect on the endurance life of the joint. A premature failure can cause noise, vibration and in extreme cases lead to the catastrophic failure of the halfshaft. The Macieliski theory to calculate the endurance life of the homokinetic joint was analyzed and an endurance test was conducted to confirm the reduced performance of the defected joint.

**KEYWORDS:** Service life, grinding burn, homokinetic joints

## ÍNDICE

	Pág.
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	2
2.1 A JUNTA HOMOCINÉTICA .....	2
2.2 QUEIMA DE RETÍFICA.....	2
2.3 FORMAÇÃO DE PITES E FADIGA SUPERFICIAL.....	3
2.4 ESFORÇOS E GEOMETRIA DE UMA JUNTA .....	3
2.5 CÁLCULO DE DURABILIDADE .....	5
2.6 ESPECIFICAÇÕES DE FABRICAÇÃO DE UMA JUNTA.....	8
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	8
3.1 AMOSTRAS PARA TESTE.....	8
3.2 TESTE DE DURABILIDADE .....	10
4. RESULTADOS.....	11
5. CONCLUSÃO.....	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	15
ANEXO 1.....	16

## 1. INTRODUÇÃO

Foi no século XVI que Gerolamo Cardano propôs uma solução para o problema de como transmitir potência entre dois eixos não paralelos, sua proposta era uma versão rudimentar do que se conhece hoje como junta universal ou Cardan. Robert Hooke, no século XVII, observou que a junta universal de Cardano era incapaz de transmitir velocidade constantemente entre os dois eixos unidos, então propôs a primeira junta com velocidade constante. Sua proposta era composta por duas juntas universais e a variação de velocidade da primeira anulava a variação da segunda, garantindo a transmissão constante. Somente em 1927, Alfred Rzeppa patenteou a primeira versão da junta homocinética que é conhecida e utilizada amplamente hoje em dia. Essa junta se aproveita de um plano de esferas, um anel externo, um anel interno e uma gaiola para realizar a transmissão constante de velocidade entre dois eixos, qualquer que seja o ângulo entre eles.



**Figura 1.1** – Junta homocinética (Fonte: [www.gkn.com](http://www.gkn.com), acesso em 14/06/17)

A junta homocinética é o resultado de uma montagem de precisão de seus componentes e, para garantir seu funcionamento ideal, seus componentes devem ser usinados respeitando tolerâncias na casa de centésimos de milímetros em suas principais cotas. São encontrados na fabricação da junta os mais variados processos de usinagem largamente utilizados pela indústria. Estampagem, retífica, fresamento e torneamento são apenas alguns exemplos.

Nenhum dos processos utilizados na fabricação da junta é livre de defeitos oriundos do próprio processo, produto ou máquina utilizada. Os defeitos de fabricação geralmente são facilmente identificados e as peças defeituosas são devidamente segregadas para evitar que peças fora do estado mínimo de qualidade exigido pelo cliente chegue ao consumidor final. Esses defeitos podem comprometer a resistência da junta e sua durabilidade em campo. O objetivo deste trabalho é estudar o impacto de um defeito muito comum em processos de retífica na vida útil da junta, a queima de retífica.

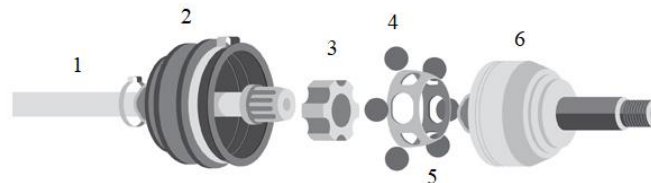
De acordo com Malkin, 2013, foi descoberto que a queima de aços utilizados para conjuntos de rolamentos tem um efeito negativo na vida útil de fadiga da peça, tal efeito pode ser atribuído principalmente à formação de martensita não-revenida. O desgaste esperado em uma junta homocinética é o mesmo encontrado em rolamentos, onde uma superfície rola sobre a outra ao invés de deslizar sobre a mesma. Esse movimento relativo causa fadiga superficial que pode ser evidenciado por pequenas remoções de material chamadas de pites, após vários ciclos de carregamento ou, no caso das juntas, revoluções.

Para estudar o impacto da queima de retífica na vida útil da junta, esse trabalho realiza a comparação entre amostras com queima de retífica e amostras sem queima de retífica em um teste de durabilidade que imita a situação em veículo. Os parâmetros a serem controlados neste tipo de teste são: velocidade de rotação, angulação da junta e torque aplicado, sendo que cada parâmetro têm o seu devido papel no desgaste da junta. Como os dois tipos de amostra, com e sem queima, foram submetidos ao mesmo tempo de teste, rotação, angulação e torque, é possível desconsiderar os valores dessas variáveis e apenas observar o desgaste de cada componente ao final do teste.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 A JUNTA HOMOCINÉTICA

A junta homocinética é composta por quatro componentes principais: anel externo, anel interno, gaiola e esferas, que podem ser vistos na figura 2.1.



**Figura 2.1** - Partes de um semieixo homocinético (Fonte: <http://www.popularmechanics.com>, acesso em 14/06/17)

O eixo (1) é responsável por fazer a ligação entre a junta deslizante (localizada no lado do diferencial do veículo) e a junta homocinética (localizada no lado da roda do veículo). A manga ou coifa e as fitas (2) são responsáveis por manter a graxa lubrificante dentro do pacote. Deve ser flexível e resistente para evitar vazamentos e permitir angulações de até 52 graus dependendo do modelo da junta. O anel interno (3) é responsável pela transmissão da potência entre as esferas e o eixo. É montado ao eixo por um encaixe com veios denominados “*splines*” e o contato com as esferas se dá em uma pista. Um anel convencional possui seis pistas para acomodar seis esferas. As esferas (4) são componentes que permitem a junta variar o plano de transmissão de potência, o que dá à junta a característica homocinética. A gaiola (5) é responsável por evitar que as esferas saiam de sua posição ideal garantindo que a junta não desmonte em uso. A ponta de eixo (6) acomoda todos os componentes na montagem e possui pistas para realizar a interface com as esferas e sua haste é montada no cubo de roda do veículo.

Este trabalho vai analisar o contato entre as superfícies das esferas (4) com as pistas do anel interno (3). A queima de retífica vai estar presente na pista do anel interno, a qual é retificada em um processo comum de sua fabricação. A junta a ser avaliada nesse trabalho é uma cujo contato entre esses componentes acontece idealmente em apenas dois pontos, pois a pista possui um formato de elipse.

### 2.2 QUEIMA DE RETÍFICA

O processo de retífica demanda uma alta quantidade de energia que é majoritariamente transformada em calor por fricção das partículas abrasivas do rebolo com a superfície da peça a ser usinada. No caso do calor gerado não ser dissipado rapidamente, ele pode causar defeitos na superfície da peça, como a queima. Como exemplo de algumas causas para a falha na dissipação do calor é possível citar o mal posicionamento do bico de refrigeração, falta de líquido de refrigeração e avanço elevado do rebolo contra a peça.

No início da queima, há uma tendência para o aumento da aderência de partículas metálicas da peça aos grãos abrasivos do rebolo, fazendo com que as forças cresçam, a superfície da peça se deteriore e a taxa de desgaste do rebolo aumente. De acordo com Malkin (2008), a descontinuidade na relação força “*versus*” desgaste da área também ocorre, o que indica uma mudança abrupta nos mecanismos de retífica possivelmente relacionados a uma transformação metalúrgica. Alguns casos diferentes podem ocorrer dependendo da severidade da queima. O mais comum para peças temperadas é a ocorrência da reaustenização seguida



da formação de martensita não revenida em alguns pontos. Como a maior parte da estrutura é austenítica, a redução da dureza superficial e subsuperficial da peça é uma das características de uma amostra com queima. A martensita não revenida criada possui um tamanho de grão maior do que os que a cercam, gerando tensões residuais abaixo da superfície da peça e atuando como um concentrador de tensão onde surgem as trincas da fadiga superficial.

### 2.3 FORMAÇÃO DE PITES E FADIGA SUPERFICIAL

A fadiga superficial ocorre quando duas superfícies metálicas apresentam movimento relativo entre si. Apresenta o mesmo mecanismo de ação que a fadiga mecânica de componentes que resulta em falha após completar os ciclos de sua vida útil, a única diferença é que ao invés de causar a falha catastrófica do componente, apenas pequenos fragmentos são removidos da superfície inicialmente, o local de remoção dos fragmentos é chamado de pite. A geometria dos elementos em contato, em conjunto com o movimento relativo entre as superfícies, gera tensões abaixo da superfície que ao receberem um caráter cíclico, criam uma trinca que se propaga até a superfície.

A junta homocinética apresenta o mesmo tipo de falha que se pode observar em rolamentos e engrenagens por possuir o mesmo mecanismo de funcionamento. O contato de seus componentes ocorre por rolamento, no qual, em teoria, não existe movimento relativo entre as superfícies, na prática esse tipo de contato é difícil de alcançar. A falha esperada para esses componentes é a formação de pites.

Segundo Wulpi, 2008, o pite em si é grave, pois frequentemente age como concentrador de tensão que pode causar falha catastrófica. O material removido da superfície é duro e quebradiço e se dispersa na graxa, gerando partículas abrasivas que por sua vez causam um desgaste maior ainda levando ao superaquecimento do componente.

De acordo com Wulpi, 2008, os pites podem ter algumas origens diferentes com mecanismos diferentes de atuação. Originado na superfície: inicialmente provoca cavidades pequenas. Pode ocorrer na combinação de rolamento com deslizamento das superfícies. Geralmente marca o limite da vida de engrenagens e rolamentos. É uma falha inevitável que em condições ideais não existem muitas possibilidades para retardá-la.

Originado abaixo da superfície: provoca cavidades pequenas e ocorre em situações de rolamento puro entre as superfícies. Pode ser minimizado com a utilização de metais com inclusões menos duras e frágeis.

Originado em peças com tratamento superficial: ocorre a remoção de pedaços grandes de material das superfícies de contato. Pode ser evitada pelo aumento da profundidade da camada tratada ou a dureza do núcleo.

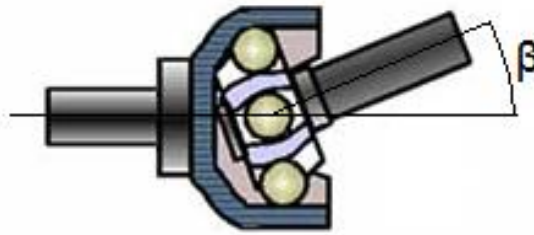
Originado por cavitação: provoca a formação de cavidades aglomeradas em superfícies que vibram ou se movem rapidamente em relação a um líquido, muito difícil de prevenir.

O contato a ser estudado será entre uma superfície côncava (anel interno) com uma convexa (esfera) e o mecanismo principal de formação de pites é o originado em peças com tratamento superficial.

### 2.4 ESFORÇOS E GEOMETRIA DE UMA JUNTA

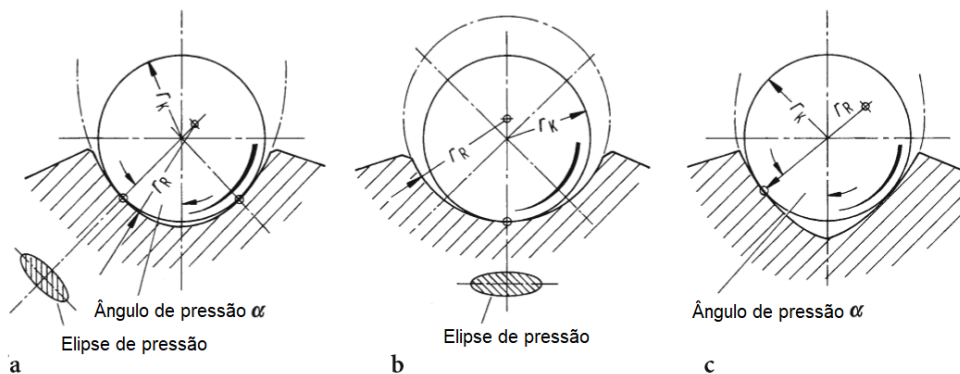
As variáveis que definem a aplicação dos esforços em uma junta são:

Ângulo: existem vários ângulos a serem considerados em uma junta. O ângulo de aplicação ( $\beta$ ) é o ângulo cuja transmissão de potência deve acontecer. Quanto maior o ângulo de aplicação, maior será o deslocamento das esferas nas pistas e maior será o desgaste da junta como pode ser observado na figura 2.2.



**Figura 2.2** – Angulação da junta (Fonte: <http://bestcars.uol.com.br>, acesso em 10/05/17)

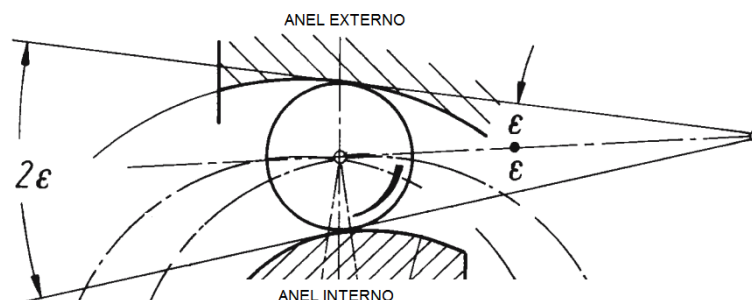
O ângulo de contato ( $\alpha$ ) da esfera com a pista é um dos principais parâmetros geométrico da junta e depende do formato da pista. Existem três tipos de pista e eles podem ser vistos na figura 2.3. Um dos parâmetros que é obtido através da escolha do formato da pista é a conformidade recíproca ( $\phi$ ) que pode ser obtida através da razão entre o raio da pista ( $r_r$ ) e o raio da esfera ( $r_k$ ).



**Figura 2.3** – Tipos de pista: **a** elíptica, **b** circular, **c** gótica. (fonte: Seherr-Thoss, 2005)

O ângulo de inclinação da pista ( $\gamma$ ) é o ângulo entre a pista e a linha de centro da haste da junta, para o tipo de junta avaliada esse ângulo é igual a zero. Apenas se encontram valores diferentes de zero em juntas tipo disco.

O ângulo de inclinação ( $\epsilon$ ) é o ângulo definido entre os pontos de contato da esfera com a pista do anel externo e interno em um corte lateral, como se pode observar na figura 2.4.



**Figura 2.4** – Ângulo de inclinação (fonte: Seherr-Thoss, 2005)

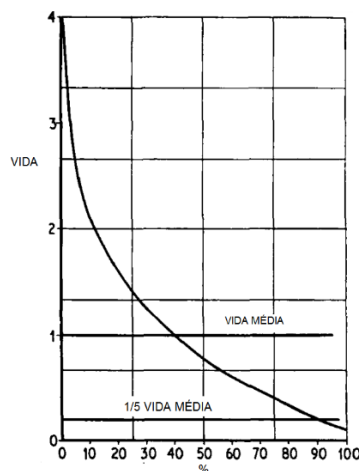
**Torque:** o torque é responsável pela força presente entre as esferas e as pistas do anel interno e externo. É transformado em um esforço normal suportado pelas pistas em dois pontos distintos, um quando o veículo anda para frente e outro quando o veículo está em marcha ré.

**Rotação:** é definida como a variável “ $n$ ” nos cálculos. A rotação é o parâmetro que caracteriza a fadiga superficial na junta homocinética por proporcionar a característica cíclica

do movimento. Em cada revolução a esfera realiza o deslocamento completo ao longo da pista do anel interno, a rotação deve ser controlada para evitar superaquecimento da junta.

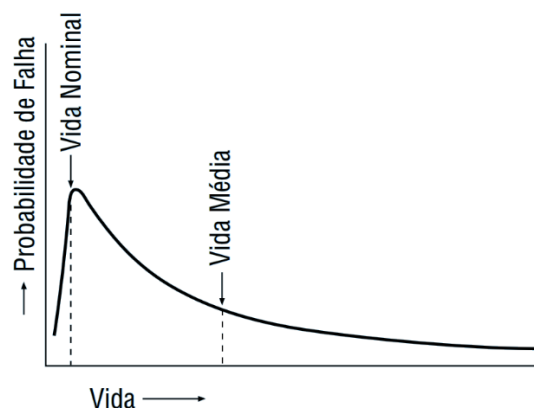
## 2.5 CÁLCULO DE DURABILIDADE

De acordo com Macielinski, 1969, quando é investigada a durabilidade de juntas por testes, os resultados são dispersos, mas se um número grande o suficiente de amostras é testado, pode-se extrair uma curva de dispersão de durabilidade dos dados. A curva de dispersão indica que a junta com a vida mais longa raramente supera quatro vezes a vida média de seu modelo e aproximadamente 90% das juntas possuem uma vida mais longa do que um quinto da vida média. Palmgren reproduziu em 1959 a curva de dispersão como se pode ver na figura 2.5.



**Figura 2.5** – Dispersão de durabilidade (fonte: Palmgren,1959)

Os cálculos de durabilidade são baseados em dados experimentais e com eles se consegue isolar o efeito de todas as características que influenciam a vida da junta, torque, rotação, ângulo, material e lubrificação. Em 1959, Palmgren concluiu que a vida de serviço de uma quantia grande de rolamentos aparentemente idênticos é o número de revoluções ou o número de horas a uma velocidade constante a qual 90% desses rolamentos não vão apresentar sinais de falha sendo que o modo de falha que ocorrerá é a formação de pites nas pistas. A distribuição de falhas de um conjunto suficientemente grande de rolamentos pode ser visto na figura 2.6.



**Figura 2.6** – Dispersão de falhas de rolamento (fonte: Catálogo NSK Rolamentos)

As juntas homocinéticas apresentam a mesma curva de dispersão de rolamentos, se utilizou a teoria de Macielinski para calcular a vida em horas que equivale à falha de 10% das amostras testadas, apresentada na figura 2.9 como a vida nominal. O cálculo de durabilidade pode ser separado em funções dependentes de seus principais parâmetros.

$$L_{10} = f(\text{rotação}) * f(\text{torque}) * f(\text{ângulo}) \quad (2.1)$$

Para a rotação, Macielinski assumiu que a falha no contato das pistas com as esferas se assemelha à falha encontrada no contato entre duas engrenagens. Dessa forma duas situações ocorrem:

Para rotações abaixo de 1000 rpm:

$$f(\text{rotação}) = \frac{25339}{n_x^{0.577}} \quad (2.2)$$

Para rotações acima de 1000 rpm:

$$f(\text{rotação}) = \frac{470756}{n_x} \quad (2.3)$$

Onde  $n_x$  é a rotação aplicada à junta.

Experimentalmente observou-se que o fator ângulo pode ser calculado pela fórmula a seguir:

$$f(\text{ângulo}) = ((1 - \text{sen } \beta) * \cos^2 \beta)^3 \quad (2.4)$$

Onde  $\beta$  é o ângulo de aplicação.

O fator torque é calculado:

$$f(\text{torque}) = \left(\frac{M_d}{M_x}\right)^3 \quad (2.5)$$

Onde  $M_x$  é o torque aplicado à condição de avaliação e o  $M_d$  é o torque dinâmico da junta. O torque dinâmico da junta é um valor que caracteriza a junta em termos de durabilidade. Macielinski observou que o toque dinâmico corresponde a uma vida de 1500 horas a 3° de angulação e 100 rpm e é calculado a partir da equação:

$$M_d = k * m * d^2 * R * \text{sen } \alpha * \cos \gamma \quad (2.6)$$

Onde  $m$  é o número de esferas da junta,  $d$  é o diâmetro das esferas,  $R$  é o raio do plano de controle, que é o raio de uma circunferência que passa pelo centro de todas as esferas,  $\gamma$  é o ângulo da pista e  $\alpha$  é o ângulo de contato da esfera com as pistas. O coeficiente  $k$  é calculado pela equação:

$$k = \left(\frac{P_0}{C_p}\right)^3 \quad (2.7)$$

Onde  $P_0$  é a pressão de Hertz admissível e  $C_p$  é o coeficiente de conformidade que pode ser calculado pelas equações a seguir:

$$C_p = \frac{858}{\mu v} * \sqrt[3]{(d \sum \delta)^2} \quad (2.8)$$

Onde  $\mu v$  são coeficientes elípticos que podem ser obtidos pela tabela no Anexo 1 a partir do coeficiente de Hertz, que pode ser calculado pela equação a seguir:

$$\cos\tau = \frac{x_l - x_q}{2 + x_l + x_q} \quad (2.9)$$

Onde  $x_l$  e  $x_q$  são as conformidades da pista e podem ser calculadas a partir das equações:

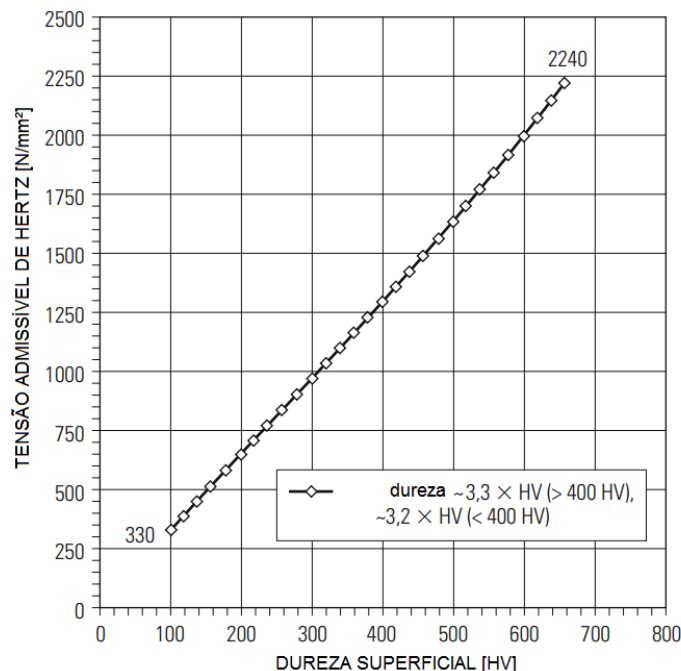
$$x_l = \frac{d}{\frac{2*(R)}{\cos\alpha * \cos\epsilon} - d} \quad \text{e} \quad x_q = \frac{1}{-\varphi} \quad (2.10)$$

Onde  $\varphi$  é a conformidade recíproca da pista, uma característica dimensional da peça e  $\epsilon$  é o ângulo de inclinação da pista, as conformidades são valores adimensionais.

O produto  $d \sum \delta$  pode ser calculado pela equação:

$$d \sum \delta = 2 * (2 + x_l + x_q) \quad (2.11)$$

De acordo com Macielinski, 1969, a pressão de Hertz admissível ( $P_0$ ) é um valor experimental obtido por testes em peças consideradas corretas, ou seja, com dimensional e propriedades dos materiais dentro das tolerâncias mínimas especificadas. A capacidade dinâmica da junta é baseada na vida de fadiga carregada sob esforço repetitivo e determina a durabilidade da junta. Foi estabelecido após extensivos testes que a pressão de Hertz permitida para aplicação contínua de torque em veículos é de 2150 N/mm<sup>2</sup>. Para se calcular a vida da junta em horas, são necessários dados do veículo ao qual a junta será empregada. Uma aproximação da curva da tensão admissível de Hertz em função da dureza superficial em Vickers pode ser vista na figura 2.7.



**Figura 2.7** – Tensão admissível de Hertz X Dureza superficial (fonte: Seherr-Thoss, 2005)

## 2.6 ESPECIFICAÇÕES DE FABRICAÇÃO DE UMA JUNTA

A pressão de Hertz permitida para cálculo da vida da junta foi obtida através de ensaios de durabilidade em peças consideradas ideais. As condições das peças foram descritas por Seherr-Thoss, 2005, e podem ser vistas na tabela 2.1.

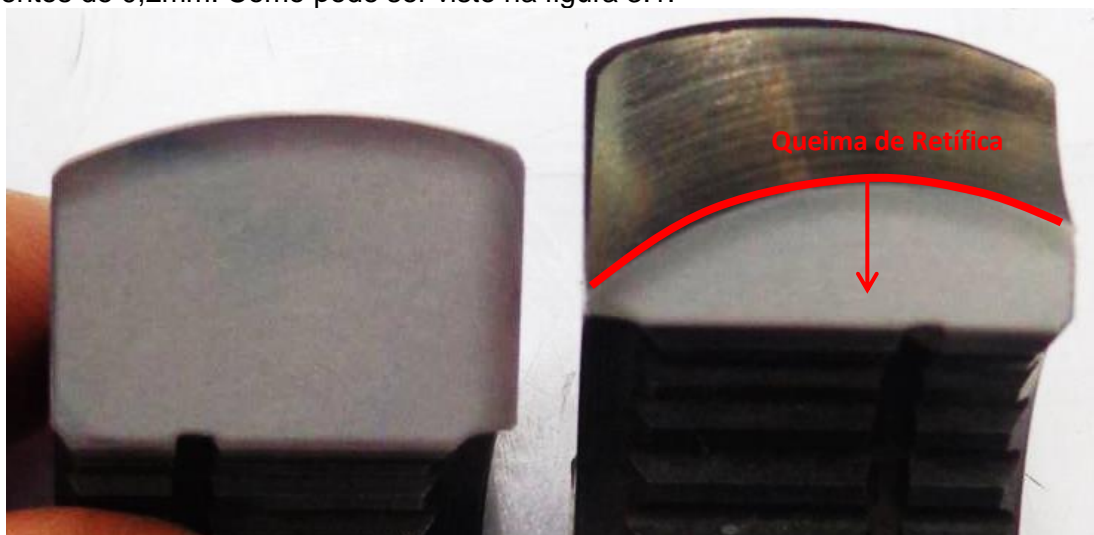
**Tabela 2.1** – Especificações de material e tratamento térmico das amostras.

Componente	Material	Dureza Superficial	Profundidade de camada	Tipo de Tratamento
Anel Interno	16 Mn Cr 5 M	58 ~62 HRC	$R_{ht} > 0,078 * d$	Têmpera por Indução

## 3 MATERIAIS E MÉTODOS

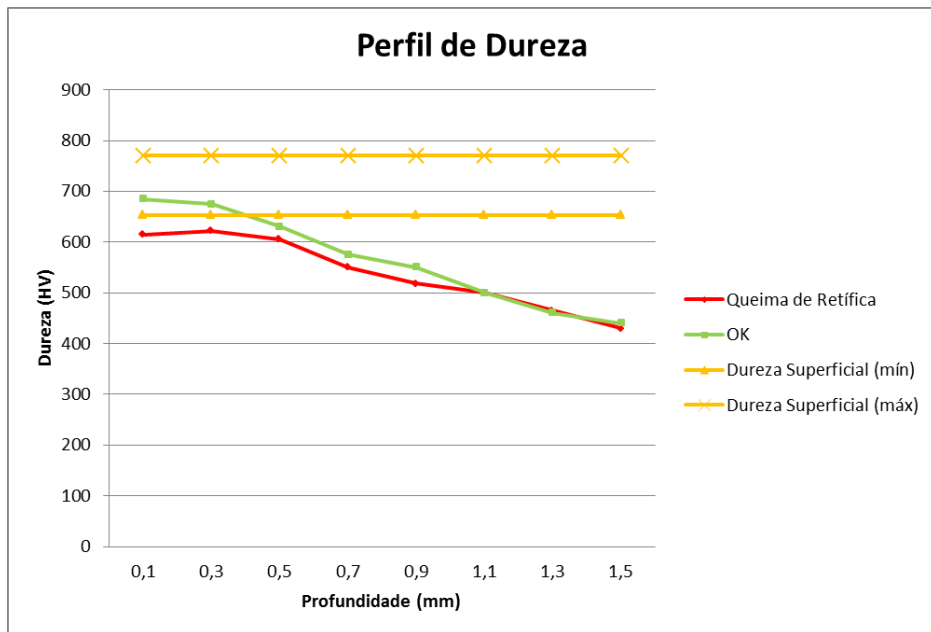
### 3.1 AMOSTRAS PARA TESTE

Para realizar o teste de durabilidade foram coletadas duas amostras de um lote de produção normal de anéis internos e foram realizadas medições das cotas que influenciam a durabilidade da junta para garantir que as dimensões da peça não interfiram no resultado do teste. Também foi realizada análise metalúrgica em uma peça do mesmo lote para eliminar a possibilidade de queima de retífica. Essas duas amostras foram testadas juntamente com duas amostras com queima de retífica. A queima foi evidenciada após a análise metalúrgica de uma peça do lote medindo o perfil de dureza, também foram realizadas as mesmas medições dimensionais nas cotas principais dessas amostras. O relatório metalúrgico evidenciou a queima de retífica e resultou uma dureza superficial nas pistas do anel de 56HRC, estando fora da faixa especificada para a utilização do valor de 2150N/mm<sup>2</sup> como pressão de Hertz admissível. A amostra foi cortada no centro da pista e a medição foi feita obtendo os valores para a dureza superficial a partir da superfície da pista na direção do centro da peça em incrementos de 0,2mm. Como pode ser visto na figura 3.1.



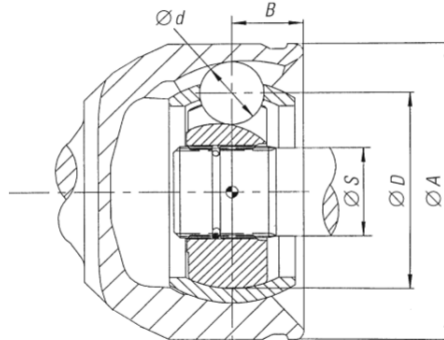
**Figura 3.1** – Amostra cortada para medição do perfil de dureza, a seta vermelha indica a posição e o sentido da medição.

O perfil de dureza das amostras com e sem queima de retífica pode ser observada na figura 3.2, os valores estão apresentados de acordo com a distância da medição até a superfície.



**Figura 3.2** – Perfil de dureza das amostras com e sem queima de retífica.

As amostras coletadas são da classificação GKN AC2600i, onde o AC significa “*Angular Contact*”. O resultado das medições dimensionais das cotas principais foi considerado satisfatório ao ponto de não influenciarem o resultado final do teste, assim é possível assumir valores nominais das dimensões para realizar os cálculos. As dimensões desse tipo de junta podem ser adquiridas da figura 3.3, onde a variável “Z”, denominada “*splines*” é o número de veios que o interior do anel interno possui para encaixar no eixo.

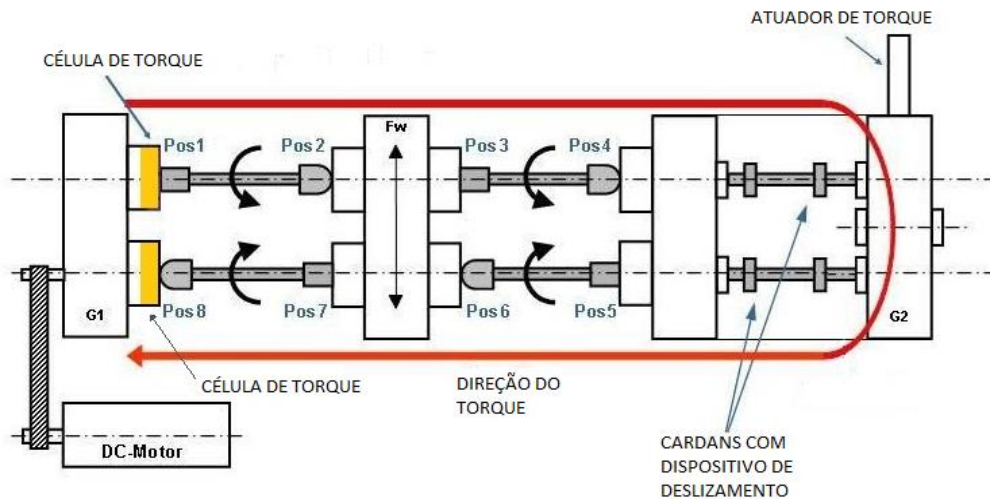


AC Joint M <sub>N</sub>	A Ø	Ø S	B	Ø d	Ø D	splines Z
1100i	67.3	17.75	17.2	14.0	44.20	18
1300i	69.85	18.80	17.47	14.600	46.10	19
1500i	72.5	19.70	17.00	15.081	48.20	20
1700i	75.2	20.53	17.63	15.875	50.00	21
2000i	79.2	21.84	18.30	16.669	53.23	22
2300i	82.2	22.67	18.75	17.462	55.50	23
2600i	84.5	23.86	19.00	18.256	57.00	24
2900i	87.5	24.51	19.30	19.050	59.20	25
3300i	91.0	25.30	19.23	19.844	61.90	26
3700i	94.2	26.60	19.80	20.638	64.20	27
4100i	97.4	27.55	20.11	21.431	66.60	28

**Figura 3.3** – Juntas fixas ACi (fonte: Seherr-Thoss, 2005)

### 3.2 TESTE DE DURABILIDADE

A máquina que executa esse teste é conhecida como 4-square. Ela testa simultaneamente quatro amostras válidas para teste. Um teste de durabilidade é um conjunto de passos em que cada passo é formado por um determinado nível de torque, rotação, ângulo e número de revoluções. Esse tipo de máquina deve ser capaz de acompanhar em tempo real as variáveis do teste e a temperatura da junta para evitar superaquecimento. Na figura 3.4 se pode observar o esquema de funcionamento de uma 4-square.



**Figura 3.4 – Máquina 4-Square**

Na máquina que realiza os testes de durabilidade são montadas quatro amostras válidas para teste. Esse trabalho realiza a comparação entre duas amostras com queima e duas amostras sem queima, montadas em configuração cruzada na máquina. As amostras com queima possuem suas juntas montadas nas posições 1, 2, 5 e 6 enquanto as amostras sem queima possuem suas juntas montadas nas posições 3, 4, 7 e 8, como pode ser visto na figura 3.3. Pela maneira que é aplicado o torque na máquina, ele possui uma direção, sendo que a montagem das amostras na máquina garante que as quatro amostras testadas estejam com o mesmo torque, ângulo e rotação aplicados.

Existem vários tipos de testes de durabilidade que visam observar o efeito de diferentes parâmetros nas juntas. Testes longos visam representar uma utilização normal de um semieixo por um veículo comum. Também existem testes tipo “*sudden death*” em que um semieixo é testado até que apresente sinais claros de falha e testes curtos que aplicam torques muito acima do torque dinâmico da junta. Da mesma forma podem ser feitos ensaios em que o objetivo é avaliar separadamente o efeito de cada variável, por exemplo, testes que aplicam altos ângulos na junta com torques e rotações moderados.

O objetivo desse trabalho é verificar que uma peça com queima de retífica tem um desempenho pior do que um sem a queima. No entanto, é ressaltado que uma peça com queima de retífica ainda pode ter uma performance aceitável no sentido de ser aprovada em testes que simulam a vida do veículo. O tipo de teste utilizado foi um de curta duração com torque, rotação e ângulo altos pela disponibilidade da utilização da máquina. Os parâmetros do teste podem ser vistos na tabela 3.1.



**Tabela 3.1** – Variáveis do teste de durabilidade

Variável	Valor
Torque	1215 Nm
Rotação	400 rpm
Ângulo	6°

#### 4 RESULTADOS

Para se calcular a durabilidade da junta são necessários os dados dimensionais das amostras a serem testadas além dos dados da tabela 2.1. Os dados dimensionais utilizados no cálculo são os nominais e podem ser observados na tabela 4.1:

**Tabela 4.1** – Valores para cálculo de durabilidade

Variável	Faixa esperada	Valor para cálculo
d	18.256 mm	18.256 mm
R	28.5 mm	28.5 mm
$\alpha$	39° ~ 42°	39°
$\epsilon$	9°	9°
$\varphi$	1.03 ~ 1.05	1.03
$P_0$	2150 N/mm <sup>2</sup>	2150 N/mm <sup>2</sup>
$\gamma$	0°	0°
m	6~8	6

Com as dimensões e características metalúrgicas é possível calcular qual a vida esperada das amostras sem queima de retífica:

Por 2.10:

$$x_l = \frac{18.256}{\frac{2 \cdot (28.5)}{\cos 39^\circ \cdot \cos 9^\circ} - 18.256} = 0.326 \quad \text{e} \quad x_q = \frac{1}{-\varphi} = -0.97$$

Por 2.9:

$$\cos \tau = \frac{0.326 - (-0.97)}{2 + 0.326 + (-0.97)} = 0.956$$

Por 2.11:

$$d \sum \delta = 2 * (2 + 0.326 + (-0.97)) = 2.712$$

Por 2.8:

$$C_p = \frac{858}{1.67} * \sqrt[3]{(2.712)^2} = 999 \left( \frac{N}{mm^2} \right)^{2/3}$$

Por 2.6:

$$M_d = \left( \frac{2150}{999} \right)^3 * 6 * 18.256^2 * \frac{28.5}{1000} * \sin 39^\circ * \cos 0^\circ = 357 Nm$$

O valor do torque dinâmico da junta sem anéis internos sem queima de retífica é 357Nm. Para calcular esse valor para as juntas com queima de retífica, precisa-se de um novo valor de pressão de Hertz admissível pois o valor de 2150N/mm<sup>2</sup> foi obtido através de testes em juntas consideradas corretas. Com os dados dimensionais e os dados do teste se pode calcular o tempo esperado de duração do teste para as juntas sem queima.

Por 2.2:

$$f(\text{rotação}) = \frac{25339}{400^{0.577}} = 798$$

Por 2.4:

$$f(\text{ângulo}) = ((1 - \text{sen } 6) * \text{cos}^2 6)^3 = 0.6947$$

Por 2.5

$$f(\text{torque}) = \left(\frac{357}{1215}\right)^3 = 0.0253$$

Por 2.1

$$L10 = 798 * 0.0253 * 0.6947 = 14 \text{ horas}$$

Os cálculos indicam que 10% das juntas testadas nessa condição de teste vão falhar com 14 horas de ensaio e o restante com durações maiores, podendo chegar até quatro vezes a vida média do modelo. O resultado do cálculo do  $L10$  nos permite realizar a programação da máquina em incrementos de 14 horas. Esse resultado foi calculado desconsiderando todas as incertezas de medição das cotas principais das amostras pois valores nominais foram utilizados.

O teste foi conduzido em três etapas. Primeiramente foi programada na máquina a duração de 14 horas para o teste, após esse período as juntas foram avaliadas e apenas polimento foi observado nas juntas. As amostras foram remontadas completando o nível de graxa perdido na desmontagem com graxa nova. É sabido que esse procedimento insere mais uma variável no sistema e pode afetar o resultado final do teste, mas como não é possível estimar o novo valor da pressão de Hertz com o resultado de um teste apenas, se continuou o ensaio para verificar que amostras com queima, sujeitas às mesmas condições de amostras normais, vão ter um desempenho pior.

Após a remontagem da peça, mais 14 horas foram programadas e após o término dessa etapa não foram encontrados pites nas pistas, então se iniciou a terceira etapa com mais 14 horas de teste. Durante a terceira etapa foi observado que houve um vazamento de graxa na junta fixa da amostra número 1 causado por um rasgo na manga e a etapa foi interrompida com 10 horas. O rasgo pode ter sido causado pelo manuseio das amostras ou em algum dos processos de montagem e desmontagem que foram realizados manualmente. Os resultados finais da avaliação após a terceira etapa podem ser vistos nas figuras 4.1, 4.2 e 4.3 e na tabela 4.2.

**Tabela 4.2 – Resultado das amostras**

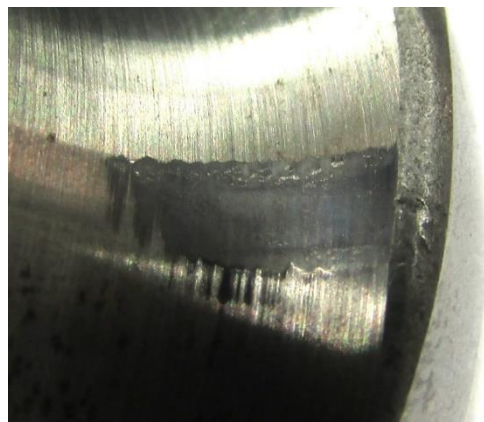
AMOSTRA	CONDIÇÃO	PISTAS	RESULTADO ENCONTRADO
1	COM QUEIMA	1	Pites aglomerados que formam uma grande remoção de material e marcas de superaquecimento (>100°C)
		2	Polimento
		3	Polimento
		4	Polimento
		5	Polimento
		6	Polimento
2	SEM QUEIMA	1	Polimento
		2	Polimento
		3	Polimento
		4	Polimento
		5	Polimento
		6	Polimento

3	COM QUEIMA	1	Pites aglomerados que formam um grande arrancamento de material
		2	Polimento
		3	Polimento
		4	Polimento
		5	Polimento
		6	Polimento
4	SEM QUEIMA	1	Polimento
		2	Polimento
		3	Polimento
		4	Polimento
		5	Polimento
		6	Polimento



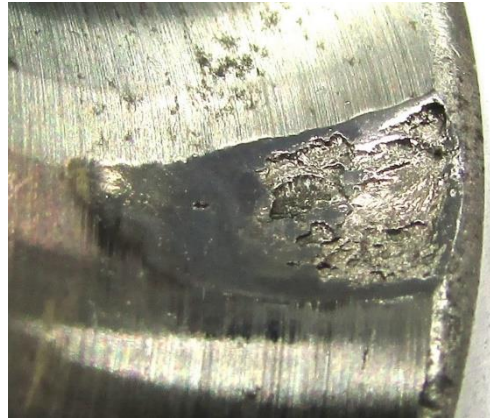
**Figura 4.1** – Amostra 1, pistas 1, amostra com queima de retífica.

A falta de lubrificação causou um superaquecimento da amostra e contribuiu para o seu desgaste acelerado, como se pode observar nas marcas escurecidas nas pistas. Por esse motivo não é possível considerar que seus pites foram formados apenas pela dureza superficial reduzida.



**Figura 4.2** – Amostra 2, pistas 1, amostra sem queima de retífica.

A figura 4.2 mostra o resultado típico de polimento na área de contato entre a esfera e a pista. Foi o resultado encontrado em cinco pistas das amostras um e três e em todas as pistas das amostras 2 e 4.



**Figura 4.3** – Amostra 3, pista 1, amostra com queima de retífica.

A figura 4.3 mostra o resultado encontrado na amostra número três. O arranchamento de material encontrado nessa pista é o modo de falha esperado para as juntas homocinéticas e é inicialmente formado por um conjunto de pites que ao passar do tempo levam ao arranchamento de pedaços maiores de material, formando uma cratera expressiva na superfície.

Como pode se observar pelas imagens, o resultado esperado foi atingido. Foram encontrados pites na pista um da amostra um e na pista um da amostra três, porém o resultado encontrado na peça um deve ser desconsiderado pelos motivos já citados anteriormente. O resultado encontrado na peça 3 foi satisfatório, sendo que não houve vazamento de graxa e superaquecimento da junta. É possível constatar que o tipo de formação de pites citado na seção 2.3, foi confirmado, onde grandes pedaços da superfície são arrancados em amostras com tratamento superficial. Esse tipo de falha é considerada como o final da vida útil da peça pois em um veículo essa cavidade causará ruído ao entrar em contato com a esfera. Pode também causar aquecimento elevado na junta, além de ser um concentrador de tensões onde uma falha catastrófica da junta pode vir a ocorrer.

Os resultados devem ser interpretados de acordo com a teoria de Macielinski, relacionando as vidas calculadas e as vidas testadas com a curva de distribuição de durabilidade. Cada uma das seis pistas das quatro amostras testadas funciona como um sistema individual. É considerado que a falha de qualquer uma das seis pistas de uma junta é igual à falha da junta como um todo, porém como cada uma das pistas é alheia à condição das outras, mesmo estando no mesmo ambiente de temperatura e graxa, é possível esperar uma distribuição de resultados dentro de uma única junta.

## 5. CONCLUSÃO

O impacto da queima de retífica na vida útil de uma junta homocinética foi avaliado e os ensaios realizados comprovam que as amostras com dureza superficial reduzida causada pela queima têm uma vida útil menor. Também se conclui que é possível existir uma tolerância para amostras defeituosas pois é sabido que a falha nas amostras ocorreu entre 28 e 38 horas de teste considerando que a vida calculada para juntas sem queima para essas condições é de 14 horas.

O cálculo de  $L_{10}$  descrito pela teoria de Macielinski nos permite definir a duração do teste escolhido em função do torque, rotação e ângulo da peça. Realizar o teste em

incrementos de  $L_{10}$  é uma prática a ser seguida que, se for aplicada à uma amostra suficientemente grande, permitirá a extração da curva de dispersão da amostra testada.

Ficou evidenciado que o cálculo da vida da junta depende de fatores geométricos, metalúrgicos e da aplicação da junta. Pela teoria de Macielinski, observa-se que o fator afetado pela dureza superficial reduzida é a pressão de Hertz admissível ( $P_0$ ) que pode ser estimada através de ensaios de durabilidade das amostras.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

MACIELINSKI, J. W., “**Paper 29. Propeller Shafts and Universal Joints – Characteristics and Methods of Selection**”, Conf. Drive Line Engineering 1970, Paper 29, 1969.

MALKIN, S., “**Grinding Technology – Theory and Applications of Machining with Abrasives**”, Industrial Press, Second Edition, 2008.

PALMGREN, A., “**Ball and roller bearing engineering**”, SKF Industries Inc., 1959.

SEHERR-THOS, Hans-christoph; SCHMELZ, Friedrich; AUCKTOR, Erich. **Universal Joints and Driveshafts: Analysis, Design, Applications**. 2. ed. Alemanha: Springer, 2005.

WULPI, D. J., “**Understanding How Components Fail**”, ASM International, Third Edition, 2008.

NSK ROLAMENTOS, “**Catálogo de Rolamentos**”, São Paulo, 2013

FOTO DE JUNTA HOMOCINÉTICA, [www.gkn.com](http://www.gkn.com), acesso em 14/06/17

IMAGEM DE JUNTA EM ÂNGULO, <http://bestcars.uol.com.br>, acesso em 10/05/17

ANEXO 1

Coefficientes elípticos de acordo com Hertz.

$\cos \tau$	$\mu$	$\nu$	$\frac{2K}{\pi\mu}$	$\mu\nu$	$\frac{2K}{\pi\mu}$	$\cos \tau$	$\mu$	$\nu$	$\frac{2K}{\pi\mu}$	$\mu\nu$	$\frac{2K}{\pi\mu}$	$\cos \tau$	$\mu$	$\nu$	$\frac{2K}{\pi\mu}$	$\mu\nu$	$\frac{2K}{\pi\mu}$	
0.9995	23.95	0.163	3.91	0.171	0.447	0.9820	6.19	0.321	1.99	0.447	0.959	4.47	0.380	1.70	0.550	1.41	0.688	
0.9990	18.53	0.185	3.43	0.207	0.450	0.9815	6.12	0.323	1.98	0.450	0.958	4.42	0.382	1.69	0.553	1.40	0.695	
0.9985	15.77	0.201	3.17	0.230	0.453	0.9810	6.06	0.325	1.96	0.453	0.957	4.38	0.384	1.68	0.556	1.39	0.702	
0.9980	14.25	0.212	3.02	0.249	0.456	0.9805	6.00	0.327	1.96	0.456	0.956	4.34	0.386	1.67	0.559	1.38	0.709	
0.9975	13.15	0.220	2.89	0.266	0.459	0.9800	5.94	0.328	1.95	0.459	0.995	4.30	0.388	1.67	0.562	1.37	0.715	
0.9970	12.26	0.228	2.80	0.279	0.462	0.9795	5.89	0.330	1.94	0.462	0.954	4.26	0.390	1.66	0.565	1.36	0.721	
0.9965	11.58	0.235	2.72	0.291	0.465	0.9790	5.83	0.332	1.93	0.465	0.953	4.22	0.391	1.65	0.568	1.35	0.727	
0.9960	11.02	0.241	2.65	0.302	0.468	0.9785	5.78	0.333	1.92	0.468	0.952	4.19	0.393	1.65	0.571	1.34	0.733	
0.9955	10.53	0.246	2.59	0.311	0.470	0.9780	5.72	0.335	1.92	0.470	0.951	4.15	0.394	1.64	0.574	1.33	0.739	
0.9950	10.15	0.251	2.54	0.320	0.473	0.9775	5.67	0.336	1.91	0.473	0.950	4.12	0.396	1.63	0.577	1.32	0.745	
0.9945	9.77	0.256	2.50	0.328	0.476	0.9770	5.63	0.338	1.90	0.476	0.948	4.05	0.399	1.62	0.583	1.30	0.755	
0.9940	9.46	0.260	2.46	0.336	0.478	0.9765	5.58	0.339	1.89	0.478	0.946	3.99	0.403	1.61	0.588	1.29	0.765	
0.9935	9.17	0.264	2.42	0.343	0.481	0.9760	5.53	0.340	1.88	0.481	0.944	3.94	0.406	1.60	0.593	1.27	0.774	
0.9930	8.92	0.268	2.39	0.350	0.483	0.9755	5.49	0.342	1.88	0.483	0.942	3.88	0.409	1.59	0.598	1.26	0.783	
0.9925	8.68	0.271	2.36	0.356	0.486	0.9750	5.44	0.343	1.87	0.486	0.940	3.83	0.412	1.58	0.603	1.25	0.792	
0.9920	8.47	0.275	2.33	0.362	0.489	0.9745	5.39	0.345	1.86	0.489	0.938	3.78	0.415	1.57	0.608	1.20	0.829	
0.9915	8.27	0.278	2.30	0.368	0.491	0.9740	5.35	0.346	1.85	0.491	0.936	3.73	0.418	1.56	0.613	1.16	0.859	
0.9910	8.10	0.281	2.28	0.373	0.493	0.9735	5.32	0.347	1.85	0.493	0.934	3.68	0.420	1.55	0.618	1.13	0.884	
0.9905	7.93	0.284	2.25	0.379	0.495	0.9730	5.28	0.349	1.84	0.495	0.932	3.63	0.423	1.54	0.622	1.10	0.904	
0.9900	7.76	0.287	2.23	0.384	0.498	0.9725	5.24	0.350	1.83	0.498	0.930	3.59	0.426	1.53	0.626	1.08	0.922	
0.9895	7.62	0.289	2.21	0.388	0.500	0.9720	5.20	0.351	1.83	0.500	0.928	3.55	0.428	1.52	0.630	1.06	0.938	
0.9890	7.49	0.292	2.19	0.393	0.502	0.9715	5.16	0.353	1.82	0.502	0.926	3.51	0.431	1.51	0.634	1.05	0.951	
0.9885	7.37	0.294	2.17	0.398	0.505	0.9710	5.13	0.354	1.81	0.505	0.024	3.47	0.433	1.50	0.638	1.04	0.962	
0.9880	7.25	0.297	2.15	0.402	0.507	0.9705	5.09	0.355	1.81	0.507	0.922	3.43	0.436	1.50	0.642	1.03	0.971	
0.9875	7.13	0.299	2.13	0.407	0.509	0.9700	5.05	0.357	1.80	0.509	0.920	3.40	0.438	1.49	0.646	1.02	0.979	
0.9870	7.02	0.301	2.11	0.411	0.513	0.969	4.98	0.359	1.79	0.513	0.918	3.36	0.441	1.48	0.650	1.01	0.986	
0.9865	6.93	0.303	2.10	0.416	0.518	0.968	4.92	0.361	1.78	0.518	0.916	3.33	0.443	1.47	0.653	1.01	0.991	
0.9860	6.84	0.305	2.09	0.420	0.522	0.967	4.86	0.363	1.77	0.522	0.914	3.30	0.445	1.47	0.657	1.01	0.994	
0.9855	6.74	0.307	2.07	0.423	0.526	0.966	4.81	0.365	1.76	0.526	0.912	3.27	0.448	1.46	0.660	1.00	0.997	
0.9850	6.64	0.310	2.06	0.427	0.530	0.965	4.76	0.367	1.75	0.530	0.910	3.23	0.450	1.45	0.664	1.00	0.999	
0.9845	6.55	0.312	2.04	0.430	0.533	0.964	4.70	0.369	1.74	0.533	0.908	3.20	0.452	1.45	0.667			
0.9840	6.47	0.314	2.03	0.433	0.536	0.963	4.65	0.371	1.73	0.536	0.906	3.17	0.454	1.44	0.671			
0.9835	6.40	0.316	2.02	0.437	0.540	0.962	4.61	0.374	1.72	0.540	0.904	3.15	0.456	1.44	0.674			
0.9830	6.33	0.317	2.01	0.440	0.543	0.961	4.56	0.376	1.71	0.543	0.902	3.12	0.459	1.43	0.677			
0.0825	6.26	0.319	2.00	0.444	0.546	0.960	4.51	0.378	1.70	0.546	0.900	3.09	0.461	1.42	0.680	0	1	1