

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**REDESENHO DE RODAS ESTAMPADAS EM AÇO**

**Rodrigo Hudson Watfe**

**São Paulo**  
**2007**

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**REDESENHO DE RODAS ESTAMPADAS EM AÇO**

Trabalho de formatura apresentado à Escola  
Politécnica da Universidade de São Paulo para  
obtenção do título de Graduação em Engenharia

Rodrigo Hudson Watfe

Orientador: Ronaldo de Breyne Salvagni

Área de Concentração:  
Engenharia Mecânica

**São Paulo**  
**2007**

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

**Watfe, Rodrigo Hudson**

**Redesenho de rodas estampadas em aço / R.H. Watfe. -- São Paulo, 2007.**

**p. 63**

**Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.**

**1.Rodas 2.Aço 3.Estampagem I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.**

## **RESUMO**

O cenário mundial do mercado automobilístico mostra que as empresas que não buscarem constantemente a competitividade terão grandes dificuldades de crescimento, com possibilidade até de não sobreviverem. Nesse contexto, as empresas têm-se direcionado para programas de melhoria contínua e de redução de custos, exatamente os mesmos programas que o presente trabalho visa contemplar, direcionado a um produto específico – as rodas estampadas em aço atualmente utilizadas pela General Motors do Brasil. O objetivo deste projeto é redesenhar essas rodas com a finalidade de reduzir seu peso total, avaliando material, projeto e espessura. A redução de custo será alcançada através do uso de menos material na manufatura das rodas e a melhoria será alcançada com o novo desempenho geral do veículo com rodas mais leves.

## **ABSTRACT**

The worldwide automotive market scenario shows that companies who do not constantly pursuit competitiveness will pass through great growth difficulties, even with possibility of not surviving. In this context, the companies have put effort on continuous improvement and costs reduction programs, exactly the same programs that the present work aims to contemplate, directed to a specific product – the steel stamped wheels currently used by General Motors do Brasil. The objective of this project is to redesign these wheels to reduce its total weight, evaluating material, design and thickness. The cost reduction will be reached through the use of less material in the wheels manufacture and the improvement will be reached with the new general performance of the vehicle with lighter wheels.

Para meus pais,  
Marilene e Hudson,  
companheiros nesta jornada,  
sem os quais nada seria possível.

Dedicado à Associação das Torcidas Organizadas da Poli (ATOP),  
cujos membros são irmãos nesta batalha e parceiros para toda a vida.

Agradecimentos ao engenheiro Leonardo Macarrão Júnior  
pela co-orientação deste trabalho.

## SUMÁRIO

1. OBJETIVO	1
2. MOTIVAÇÃO	2
3. METODOLOGIA	4
4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
4.1. Estampabilidade	5
4.1.1. Coeficiente de encruamento	6
4.1.2. Anisotropia	6
4.2. Ensaio de estampabilidade	9
4.2.1. Ensaio Erichsen	10
4.2.2. Ensaio Olsen	11
4.2.3. Observações sobre os testes Erichsen e Olsen	11
4.2.4. Aspectos críticos dos testes Erichsen e Olsen	12
4.2.5. Principais normas para os testes	12
4.2.6. Outros ensaios	13
4.2.7. Máquinas para os ensaios de estampabilidade	16
4.3. Curvas Limite de Conformação (CLC)	18
4.3.1. Determinação da CLC	20
4.3.2. Impressão da rede de círculos	21
4.3.3. Preparação dos Corpos de Prova (CPs)	22
4.3.4. Construção da CLC	23
5. ESTABELECIMENTO DA NECESSIDADE	26
5.1. Avaliação competitiva do mercado	37
5.2. Necessidades declaradas <i>versus</i> necessidades reais	39
5.3. Necessidades culturais	40
5.4. Necessidades implícitas	40
5.5. Necessidades percebidas	41

6. ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA DA NECESSIDADE	42
7. SÍNTESE DE SOLUÇÕES	43
7.1. Redefinição da geometria das rodas atuais	43
7.2. Rodas Kühl	43
7.3. Aço duplex ( <i>dual-phase steel</i> )	44
8. ANÁLISE DE VIABILIDADE	46
8.1. Viabilidade técnico-legal	46
8.2. Viabilidade econômica	47
8.3. Viabilidade ambiental	48
9. ELABORAÇÃO DAS PROPOSTAS	49
9.1. Redefinição da geometria das rodas atuais	49
9.2. Rodas Kühl	52
9.3. Aço duplex ( <i>dual-phase steel</i> )	56
10. CONCLUSÕES	61
11. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	62

## 1. OBJETIVO

Objetiva-se com este trabalho a redução do peso total das rodas estampadas em aço atualmente utilizadas pela General Motors do Brasil, a partir da elaboração de modificações de projeto que mantenham os padrões de qualidade e segurança. O objetivo será alcançado através de redesenho que envolverá avaliações do projeto, do material e da espessura dessas rodas.

A redução do peso das rodas melhorará o desempenho geral do veículo, devido à redução das massas não suspensas e da inércia dessas rodas, o que aumentaria o rendimento da transmissão de torque; poderá levar também a uma diminuição de custo, devido à redução de quantidade de material.

O resultado deste trabalho será o projeto básico de uma roda estampada em aço que siga os padrões de qualidade e segurança da General Motors do Brasil e que atenda a todos os requisitos de desempenho que serão estabelecidos neste projeto.

O presente trabalho será desenvolvido dentro do programa PACE (*Partners for the Advancement of Collaborative Engineering Education*), em parceria com a General Motors do Brasil.

## 2. MOTIVAÇÃO

O cenário mundial do mercado automobilístico mostra poucas oportunidades de crescimento do consumo de novos veículos nos pólos tradicionais, como Estados Unidos, Europa e Japão. Esses mercados estão saturados, e a alternativa para o crescimento reside nos mercados emergentes, como América Latina e Ásia, onde o alto número de habitantes por veículo demonstra o potencial de absorção dessas economias (tabela 2.1).

Tab. 2.1 – Relação habitantes/veículo em 2003 (fonte: ANFAVEA)

País	Hab./veículo
Estados Unidos	1,3
Itália	1,5
Austrália	1,6
Japão	1,7
Alemanha	1,7
França	1,7
Canadá	1,7
Espanha	1,7
Reino Unido	1,8
Suécia	2,0
Coréia do Sul	3,3
México	5,5
Argentina	5,5
Brasil	8,4
China	~200

A indústria automotiva brasileira não é a primeira opção para os investimentos internacionais, ficando nesse quesito atrás de, por exemplo, China e México. Isso ocorre devido à somatória de vários fatores macroeconômicos que atualmente influenciam a tomada de decisão dos investidores: prática de juros altos, moeda valorizada, custos estruturais crescentes e mercado interno com muitas

variações (figura 2.1). Ainda assim, a concorrência para as indústrias nacionais vem aumentando drasticamente nos últimos anos. Entre 1996 e 2002, foram inauguradas 22 novas fábricas de veículos automotores no Brasil.

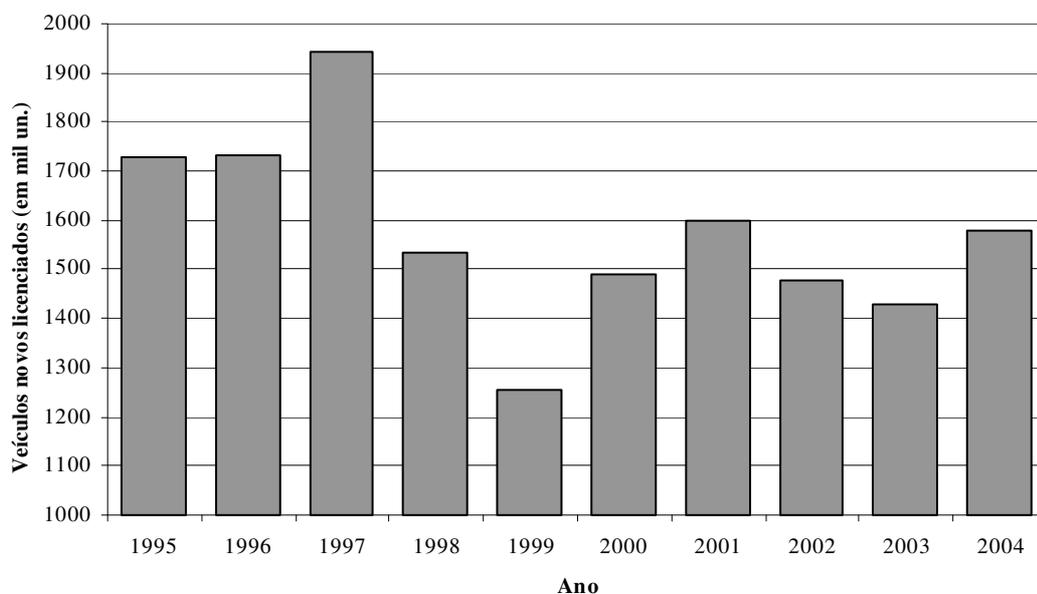


Fig. 2.1 – Veículos novos licenciados no Brasil entre 1995 e 2004  
(fonte: ANFAVEA)

Nesse contexto, na busca por crescimento e, em alguns casos, até por sobrevivência, as indústrias automotivas nacionais têm investido seus esforços em programas de melhoria contínua e redução de custos, visando a dois resultados essenciais à competitividade: agregação de valor a seus produtos, para aumentar a qualidade percebida dos mesmos, e redução dos custos estruturais, de materiais e de fornecedores, para aumentar a lucratividade.

O presente trabalho é motivado pelo cenário que acaba de ser citado, na busca incessante por competitividade através do aumento de qualidade e/ou redução de custo dos produtos, no caso, rodas estampadas em aço.

### 3. METODOLOGIA

Será utilizada neste trabalho a metodologia de elaboração de um Estudo de Viabilidade seguido pelo Projeto Básico do produto. No Estudo de Viabilidade serão contempladas as seguintes etapas, em ordem cronológica: estabelecimento da necessidade, especificação técnica da necessidade, síntese de soluções e análises de viabilidade.

Segundo Kaminski (2000), o estabelecimento da necessidade consiste da observação criteriosa e consistente da necessidade cujo atendimento é objetivo deste trabalho. Nesta etapa serão evidenciadas as diferenças entre as necessidades reais, declaradas, culturais, implícitas e percebidas dos consumidores ou do produto.

Com a especificação técnica da necessidade serão quantizadas as características relevantes do produto, resultando em um conjunto de requisitos funcionais, operacionais e construtivos a ser atendido pelo produto.

A síntese de soluções consiste da concepção de projetos que possam atender à necessidade. Nessa etapa, os elementos que compõem as soluções serão caracterizados fundamentalmente pelas suas funções, ficando para as etapas seguintes a sua definição completa.

Na fase de análises de viabilidade serão avaliadas as reais possibilidades de implementação do projeto frente a requisitos técnico-legais, econômicos, financeiros e ambientais.

O Projeto Básico consistirá da elaboração de propostas referentes às soluções classificadas como possíveis com base nas análises de viabilidade.

Por tratar-se de um projeto de melhoria de um produto já existente, tomar-se-á como referência limitadora as características das rodas atualmente utilizadas pela General Motors do Brasil. Assim, as rodas obtidas como resultado deste projeto deverão estar otimizadas em relação às atuais, em uma ou mais características. Caso seja necessário o detrimento de uma característica em relação às rodas atualmente em uso, deverá ser justificado, de preferência economicamente, em termos de ganhos nas outras características. Esse procedimento garantirá que o produto final deste projeto seja, de alguma forma, propostamente melhor do que o atual em produção, ou então este projeto terá como subproduto a ratificação das rodas atualmente em produção.

## **4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **4.1 Estampabilidade**

Durante uma seqüência de estamparia complexa de chapas podem coexistir várias operações, que são denominadas genericamente de conformação de chapas. Entre essas operações, destacam-se o estiramento, ou repuxamento, e a estampagem. O processo de estiramento consiste em afinar a espessura de uma chapa por meio de um punção, prendendo-se a chapa numa matriz, de modo a impedir que o material deslize para dentro da matriz. No caso do processo de estampagem, por outro lado, a chapa não é presa, sendo então arrastada para dentro da matriz durante a operação. Dificilmente, em um processo de conformação de chapas, ter-se-á estiramento ou estampagem puros. Sempre existirá uma combinação destas duas operações com outras.

A estampabilidade de materiais metálicos é a capacidade que uma chapa tem para ser conformada à forma de uma matriz, pelo processo de estampagem, sem se romper ou apresentar qualquer outro tipo de defeito superficial ou de forma. A análise da estampabilidade de chapas é significativa tanto para o usuário do material em uma planta de estamparia como para o fabricante da chapa.

A avaliação da estampabilidade de uma chapa exige que sejam executados muitos testes, tais como: ensaios simulativos (tipo Erichsen, Olsen, Fukui etc), ensaios de tração (obtendo-se o limite de escoamento e de resistência, a razão elástica, o alongamento total até a fratura, o coeficiente de encruamento, os coeficientes de anisotropia normal e planar), ensaios de dureza, medida da rugosidade do material, metalografia etc.

Ainda assim, a análise é incompleta, pois nas operações reais de estampagem ocorre uma combinação complexa dos tipos de conformação. A estampabilidade torna-se função não somente das propriedades do material, mas também das condições de deformação e dos estados de tensão e de deformação presentes.

#### 4.1.1. Coeficiente de encruamento

O coeficiente de encruamento é um parâmetro que tem importante papel na estampabilidade dos materiais. É comumente definido em função da Equação de Hollomon:

$$\sigma = \sigma_0 + k\varepsilon^n$$

Onde  $\sigma_0$  é a tensão de escoamento,  $k$  é um índice de resistência e  $n$  é o coeficiente de encruamento.

Quanto maior for o coeficiente de encruamento maior será a capacidade do material se deformar, em tração, sem que ocorra a estrição. Assim, o coeficiente de encruamento é uma medida da ductilidade do material importante a considerar, principalmente quando se realiza uma operação com forte componente de estiramento. Quanto maior for o coeficiente de encruamento maior será a capacidade do material se deformar, em tração, sem que ocorra a estrição.

A medição do coeficiente de encruamento é simples, deve-se linearizar a equação de Hollomon, através da aplicação de logaritmos (não importando a base) e, então, faz-se uma regressão linear de  $\log \sigma$  versus  $\log \varepsilon$ , a partir dos dados obtidos em ensaio de tração uniaxial. Chega-se assim ao coeficiente angular da reta representativa da equação linearizada.

#### 4.1.2. Anisotropia

Durante os processos de conformação de chapas, grãos cristalinos individuais são alongados na direção da maior deformação de tração. O alongamento é consequência do processo de escorregamento do material durante a deformação. Nos materiais policristalinos os grãos tendem a girar para alguma orientação limite devido a um confinamento mútuo entre grãos. Este mecanismo faz com que os planos atômicos e direções cristalinas dos materiais com orientação aleatória (materiais isotrópicos) adquiram uma textura (orientação preferencial). Os materiais conformados se tornam anisotrópicos.

A distribuição de orientações tem, portanto um ou mais máximos. Se estes máximos são bem definidos são chamados de orientações preferenciais, que irão ocasionar variações das propriedades mecânicas com a direção, ou seja, anisotropia. Um modo de avaliar o grau de anisotropia das chapas quando deformadas plasticamente é através do coeficiente de anisotropia.

Por definição, o coeficiente de anisotropia ou coeficiente de Lankford ( $r$ ) é a razão entre a deformação verdadeira na largura ( $\epsilon_w$ ) e na espessura ( $\epsilon_t$ ) de um corpo de prova de tração, após determinada deformação longitudinal pré-definida.

$$r = \epsilon_w / \epsilon_t$$

Considerando a anisotropia no plano da chapa, geralmente são definidos dois parâmetros:

a) Coeficiente de anisotropia normal ( $r^-$ ):

coeficiente de anisotropia normal
$r^- = \frac{r_{0^\circ} + 2 \times r_{45^\circ} + r_{90^\circ}}{4}$

onde:  $r_{0^\circ}$ ,  $r_{45^\circ}$  e  $r_{90^\circ}$  são os valores de  $r$  medidos a  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $90^\circ$  com a direção de laminação.

Este parâmetro indica a habilidade de uma certa chapa metálica resistir ao afinamento, quando submetida a forças de tração e/ou compressão, no plano.

b) Coeficiente de anisotropia planar ( $\Delta r$ ):

coeficiente de anisotropia planar
$\Delta r = \frac{r_{0^\circ} - 2 \times r_{45^\circ} + r_{90^\circ}}{2}$

O coeficiente de anisotropia planar indica a diferença de comportamento mecânico que o material pode apresentar no plano da chapa.

Um material isotrópico tem  $r^- = 1$  e  $\Delta r = 0$ . Nos materiais para estampagem profunda um alto valor de  $r$  é desejado (maior resistência ao afinamento da chapa). A relação entre  $r$  e a razão limite de estampagem é mostrada na figura 4.1. Essa é

definida como a máxima razão possível entre o diâmetro do *blank* e do copo embutido, sem que ocorra falha.

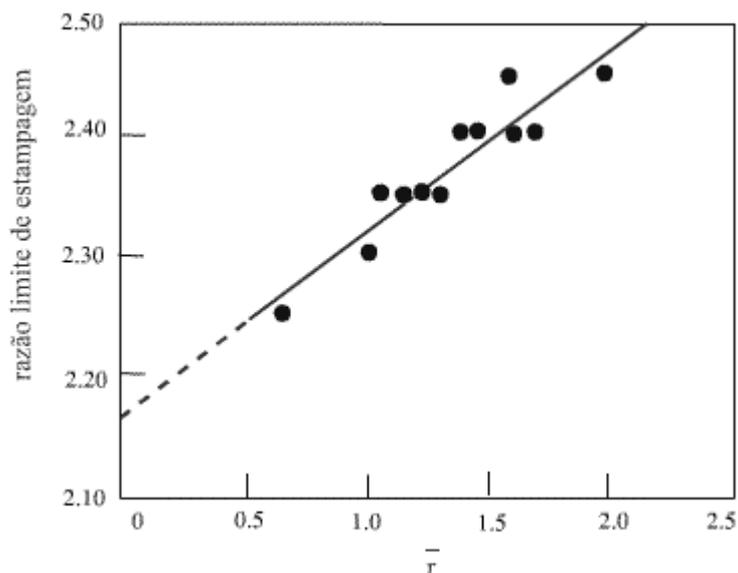


Fig. 4.1 – Relação entre  $\bar{r}$  e a razão limite de estampagem.

A obtenção dos coeficientes de anisotropia normal e planar é realizada através do ensaio de tração, segundo a norma ASTM E517-00 (*Standard Test Method for Plastic Strain Ratio  $r$  for Sheet Metal*).

Os corpos de prova definidos pela norma são deformados plasticamente abaixo da estricção, medindo-se os comprimentos e larguras iniciais e finais e aplicando as equações correspondentes. Para determinação dos coeficientes de anisotropia normal e planar são retirados corpos de prova a 0, 45 e 90° em relação à direção de laminação.

Há ainda a medição através do "modul  $r$ ", aparelho que mede a frequência de ressonância do metal, a qual se correlaciona com a magnetoestricção (variação elástica das dimensões do material, quando este é submetido a um campo magnético), a qual é função do módulo de Young, que varia de acordo com a orientação preferencial dos planos cristalográficos e portanto, correlaciona-se com o coeficiente de anisotropia.

## 4.2. Ensaio de estampabilidade

Em virtude da complexidade das operações de estampagem de chapas, as simples medidas de propriedades mecânicas obtidas pelo ensaio de tração são de valor limitado. Assim, foram desenvolvidos alguns ensaios simulativos para avaliar a estampabilidade das chapas metálicas (ver figura 4.2). Os ensaios simulativos consistem basicamente em estirar um corpo de prova de forma definida até que os primeiros sinais de ruptura apareçam. A partir daí são medidos parâmetros geométricos para avaliação.

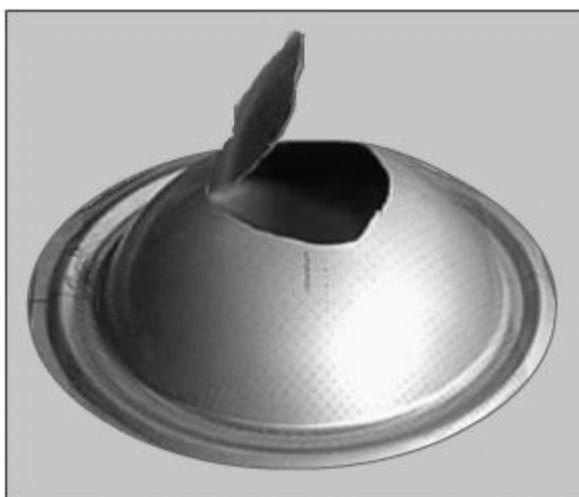


Fig. 4.2 – Aspecto de corpo de prova fraturado no ensaio de estampabilidade.

Destacam-se os ensaios Erichsen e Olsen. Deve-se entretanto enfatizar que existem inúmeros ensaios para a avaliação da estampabilidade, a maioria deles não padronizada. As variantes entre os diversos métodos são basicamente as diferenças entre formas de punções e corpos de prova.

Os corpos de prova, usualmente referenciados como *blanks* podem ter forma circular, elíptica, quadrada ou retangular. Os punções (ou estampos) também podem ter várias formas e dimensões.

#### 4.2.1. Ensaio Erichsen

O ensaio Erichsen (mais utilizado na Europa e Japão) consiste em estirar um corpo de prova em forma de disco até o surgimento de uma ruptura incipiente, medindo-se então a profundidade do copo assim formado. Esta profundidade, expressa em milímetros, representa o índice de ductilidade Erichsen (IE).

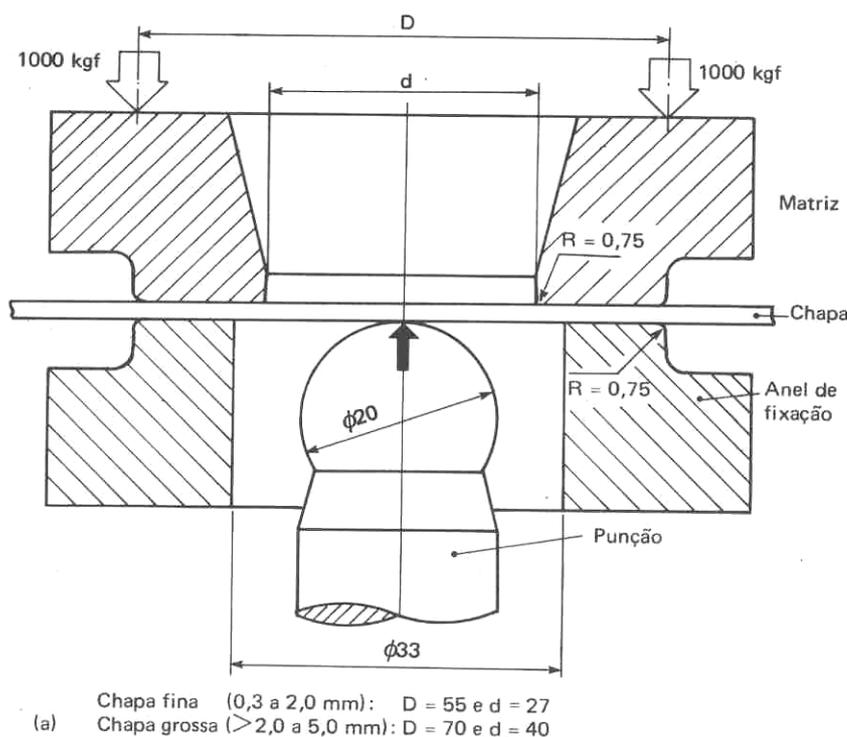


Fig. 4.3 – Ensaio de embutimento Erichsen.

O disco de chapa é inicialmente fixado entre a matriz e o anel de sujeição com carga de 1.000 kgf. O estampo tem formato esférico com diâmetro de 20mm (ver figura 4.3). A cabeça do estampo é lubrificada (normalmente com uma graxa grafitada termo-resistente). O ensaio submete a peça primeiramente a um estiramento biaxial, e o resultado obtido é influenciado pela espessura da chapa.

O corpo de prova, como já mencionado tem formato de um disco , com diâmetro de 90mm. A espessura nominal da chapa para o teste comumente varia entre 0,3 mm e 2 mm. Mas existem também dispositivos capazes de ensaiar chapas com espessura nominal de até 5mm.

#### **4.2.2. Ensaio Olsen**

O ensaio Olsen (mais utilizado nos Estados Unidos) difere do Erichsen apenas quanto às dimensões do estampo que tem cabeça esférica com 22 mm (7/8 pol) de diâmetro. O corpo de prova tem forma de disco e é fixado entre matrizes em forma de anel com 25 mm (1 pol) de diâmetro interno. Durante o teste são medidas continuamente a carga e a altura do copo.

O índice de ductilidade Olsen é dado pela altura do copo, em milésimos de polegada, no momento em que a carga começa a cair.

O corpo de prova tem formato de disco com diâmetro de 95mm. A espessura nominal da chapa para o ensaio Olsen é limitada a 1,57 mm (0,062 pol) devido à folga entre o estampo e as matrizes.

#### **4.2.3. Observações sobre os testes Erichsen e Olsen**

A velocidade do estampo deve ficar entre 0,08 e 0,4 mm/s . O fim do teste corresponde ao ponto de queda da carga, causado pela estricção da chapa. Se a máquina de teste não for equipada com um indicador de carga, o ponto final do teste é definido pelo aparecimento da estricção ou pela fratura do corpo de prova na região do domo.

Sob as mesmas condições o ensaio Erichsen fornece maior ductilidade que o Olsen, devido à diferente dimensão do estampo. Para idênticos materiais, em cada ensaio a medida da ductilidade aumenta de modo aproximadamente linear com a espessura.

Além do índice de ductilidade, esses ensaios fornecem indicações qualitativas sobre a granulação do material e, a partir da localização e do aspecto da trinca formada, pode-se obter informações sobre a homogeneidade, o fibramento mecânico, defeitos locais etc.

Em teoria os testes Olsen e Erichsen são estiramentos puramente biaxiais. Desta forma deveriam se correlacionar com parâmetros de estiramento, especialmente o coeficiente de encruamento  $n$  . Os dados de teste entretanto mostram bastante dispersão, devido à fricção entre a superfície do estampo e o corpo de prova.

A correlação entre os valores de diferentes testes pode ser melhorada quando se usa um sistema de lubrificação padronizado. A norma ASTM E643 estabelece o uso de vaselina de petróleo no estampo e admite outros sistemas como lâmina de polietileno combinada com óleo, desde que haja acordo entre fornecedor e consumidor.

#### **4.2.4. Aspectos críticos dos testes Erichsen e Olsen**

Os parâmetros de teste não são suficientemente definidos. Estes parâmetros incluem a determinação do ponto final do teste, procedimentos de lubrificação, sujeição adequada do corpo de prova e controle de velocidade. Por exemplo, se os dispositivos de sujeição não engastam adequadamente as bordas do corpo de prova, o material flui para a cavidade da matriz de estampagem, aumentando a altura do domo na qual ocorre a falha.

O pequeno diâmetro do estampo pode introduzir um componente de flexão quando a razão entre o raio do estampo e a espessura da chapa for inferior a 10 ou 15. Pode-se então dizer que o componente de flexão aparece para espessuras de chapa maiores do que 1mm, alterando o estado de tensões e deformações.

Uma área relativamente pequena da chapa metálica sob investigação é avaliada para cada teste.

Freqüentemente são necessárias correções dos valores obtidos nos teste para que seja possível a comparação de chapas de diferentes espessuras do mesmo material.

#### **4.2.5. Principais normas para os testes**

##### ABNT

NBR5902 (mod.11/1980) – Determinação do índice de embutimento em chapas de aço pelo método Erichsen – Aplica-se a chapas de aço de espessura nominal entre 0,3 e 5,0 mm.

##### ASTM

E643-84(2000) *Standard Test Method for Ball Punch Deformation of Metallic Sheet*

*Material* – Cobre a padronização dos parâmetros do teste Olsen. É aplicável a chapas de espessuras entre 0,008” e 0,80” (0,2mm e 2,0 mm).

#### ISO

ISO 20482(2003) – *Metallic materials – Sheet and strip – Erichsen cupping test* – aplica-se a chapas de espessuras entre 0,1 e 2,0 mm.

### **4.2.6. Outros ensaios**

Além dos testes Erichsen e Olsen, muitos testes de laboratório têm sido desenvolvidos para medir e controlar a estampabilidade de chapas metálicas. As diferenças entre eles são relativas às dimensões e formatos dos estampos. A seguir descreve-se resumidamente os testes mais conhecidos.

#### **Teste da Altura Limite do Domo**

Foi desenvolvido para simular mais efetivamente as condições de fratura encontradas na maioria das peças reais. O estampo tem forma hemisférica de grande diâmetro – em geral 100 mm. O ensaio é executado em chapas de aço de diferentes larguras. As chapas são impressas com redes de círculos de 2,5 mm de diâmetro. A deformação na largura é medida sobre o círculo da grade mais próximo da fratura.

O teste simula mais precisamente a ocorrência de fratura que ocorre numa operação real de estampagem. Neste teste a lubrificação não é importante, sendo comum executar o teste sem lubrificante. O teste é demorado, mas obtém-se resultados que são altamente dependentes da espessura da chapa.

#### **Teste Swift (teste do copo)**

O teste executa o estiramento do copo com fundo hemisférico ou plano e corpo cilíndrico. A chapa é presa por sujeitadores. A lubrificação é feita com poletileno e óleo. O estampo pode ter os diâmetros de 19, 32 e 50 mm para uso em corpos de diferentes espessuras.

Os corpos de prova podem ter diversas espessuras correspondentes aos diâmetros dos estampos. As faixas recomendadas são: de 0,3 a 1,24 mm , de 0,32 a 1,30 mm e de 0,45 a 1,86 mm para cada dimensão de estampo especificada acima. O teste também prevê o estiramento de copo quadrado. Neste caso o estampo é um prisma de seção quadrada com 40 mm de lado e o corpo de prova é um disco de 80mm de diâmetro (espessuras de 0,2 a 2 mm).

A estampabilidade é estimada pela comparação de uma série de *blanks* de diâmetro crescente. O tamanho máximo do *blank* que puder ser estampado sem fratura na região da cabeça do estampo é usado para o cálculo da taxa limite de estampagem. O valor é a simples divisão do diâmetro do *blank* pelo diâmetro do estampo.

Apesar da boa correlação do teste com operações reais, devido à questões de forma e alinhamento, a reprodutibilidade do teste entre laboratórios não é boa. O teste requer um grande número de *blanks* de diferentes tamanhos para fornecer um resultado confiável.

### **Teste Englehardt**

É uma variação do teste Swift onde o estiramento do copo é levado até a carga máxima de estampagem. Só então as bordas do *blank* são fixadas e o teste continua até a fratura.

### **Teste Fukui (teste do copo cônico)**

O teste Fukui foi desenvolvido para acompanhar a performance de um material em conformação com operações simultâneas de estampagem e estiramento. A matriz tem formato cônico com ângulo de entrada de 300. A cabeça do estampo tem forma hemisférica.

As espessuras dos corpos de prova ficam em geral entre 0,5 e 1,6 mm. A altura do copo no momento da fratura é a medida de estampabilidade.

Foi demonstrado que o teste é influenciado principalmente pelo estiramento, com alguma dependência da estampabilidade. Então o teste não tem boa correlação

com o alongamento uniforme como outros testes. Não é portanto um teste com larga aceitação como teste simulativo.

### **Teste Marciniak** (de estiramento)

É um teste de domo modificado. Foi projetado para contornar os severos gradientes de deformação desenvolvidos em teste de domo com estampo hemisférico. Se uma chapa plana é simplesmente fixada e um estampo de cabeça plana é forçada contra a chapa apenas uma quantidade muito limitada de estiramento é possível antes que a fratura ocorra. O baixo nível de deformação que ocorre na porção plana (central) do *blank* é um estado biaxial balanceado pois a sollicitação é igual em todas as direções. Para aumentar o nível de deformações do fundo plano o metal deve escorregar sobre o estampo. Para promover o escorregamento um *blank* guia é colocado entre o estampo e a chapa. O *blank* guia tem um furo central que expande e facilita o escorregamento do metal sobre a cabeça do estampo com uma força aplicada relativamente pequena. O metal do *blank* de teste na região do furo do *blank* guia alonga em todas as direções.

Os corpos de prova e *blanks* guia têm em geral 8" de diâmetro (203 mm) para estampos de 102 mm de diâmetro. O *blank* guia pode ter forma quadrada. As espessuras do corpo de prova e do *blank* guia devem ser de mesma ordem para evitar que a fratura ocorra no *blank* guia.

O teste requer uma preparação adicional dos *blanks* guia, com ajustes de alinhamento antes do teste efetivo. É aplicável ao ensaio de metais revestidos.

Uma grande variedade de outros teste simulativos estão disponíveis na literatura. Alguns são bem definidos, com todas variáveis e parâmetros especificados. Outros são essencialmente indefinidos com variações de equipamento e procedimentos para cada pesquisador. Cada teste representa uma tentativa de reproduzir uma porção de uma operação complexa de estampagem ou um modo de conformação específico. Alguns são efetivos, outros não. A mudança de um modo crítico de estampagem leva a mudanças na forma do teste. A tendência atual é aumentar o número de testes simulativos para ampliar a caracterização de um metal

ou lubrificante específico. Em adição os testes simulativos fornecem excelentes dados para a verificação de modelos matemáticos de simulação.

#### 4.2.7. Máquinas para os ensaios de estampabilidade

O ensaio de estampabilidade pode ser executado em prensas convencionais de pequeno porte, com aplicação de carga compressiva.

As máquinas de ensaio universal, com controle eletro-mecânico, hidráulico ou pneumático podem ser utilizadas, desde que capazes de fornecer as leituras de forças em níveis de grandeza compatíveis com o ensaio. Nesta alternativa os dispositivos de conformação devem ser adequadamente montados e adaptados na mesa e no cabeçote.

As maiores variações entre testes dizem respeito aos equipamentos auxiliares, como sistemas de fixação, formatos de punções, roletes e matrizes.

Existem no mercado máquinas específicas para a realização dos ensaios de estampabilidade. Estas máquinas podem ser de piso ou de bancada e normalmente vêm acompanhadas de conjuntos completos de acessórios. Exemplos de equipamentos de mesa e de piso são mostrados nas figuras 4.4 e 4.5.

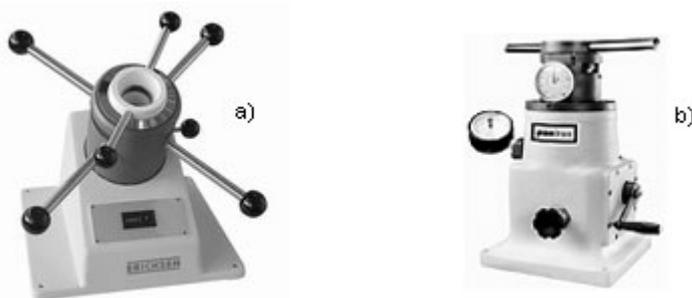


Fig. 4.4 – a) Máquina para ensaio Erichsen para chapas até 1,25mm;  
b) Máquina para ensaios Olsen e Erichsen para chapas de 0,2 a 4,0 mm.



Fig. 4.5 – Máquina de piso para ensaio Erichsen.

Formatos de matrizes e punções dependem do tipo de teste a executar. Na figura 4.6 podem ser vistas montagens específicas para os testes da Altura Limite do Domo e Marciniak.

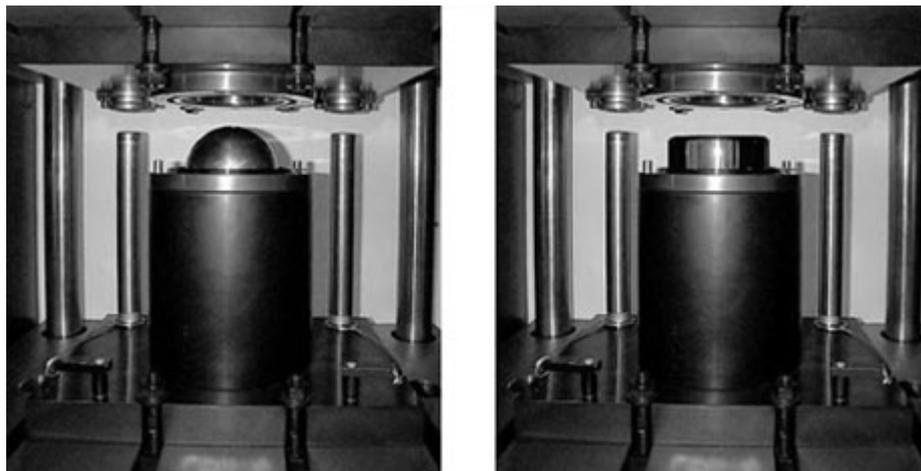


Fig. 4.6 – Montagens para os testes da Altura do Domo (esq.) e Marciniak (dir.).

Os acessórios incluem anéis de fixação, punções e outros dispositivos auxiliares. Alguns destes dispositivos são mostrados na figura 4.7.



Fig. 4.7 – Formatos de punções (esq.) e anéis de fixação (dir.).

### 4.3. Curvas Limite de Conformação (CLC)

A tênue correlação freqüentemente encontrada no teste comum de estampabilidade e o desempenho real do metal na produção de peças levou os pesquisadores a investigar parâmetros mais fundamentais. A estrição localizada requer uma combinação crítica de deformações principais máxima e mínima (ao longo de duas direções perpendiculares sobre o plano da chapa). Este conceito levou ao desenvolvimento de diagramas conhecidos como Curvas Limite de Conformação, abreviada como CLC (ou FLD em inglês). A CLC é uma ferramenta importante para as técnicas de teste de estampabilidade.

Cada tipo de chapa metálica (aço, alumínio, latão etc) pode ser deformado até um certo nível para que ocorra a estrição localizada e a fratura. Este nível depende principalmente da combinação de deformações impostas, ou seja, da relação entre as deformações principais, maior e menor. O nível mais baixo de deformações ocorre no estado plano de deformações ou próximo dele, isto é, quando a deformação principal menor é zero.

A CLC é um gráfico da deformação principal maior no início da estrição plotado para todos os valores da deformação principal mínima que podem ser suportados. Uma curva típica para o aço pode ser vista na figura 4.8.

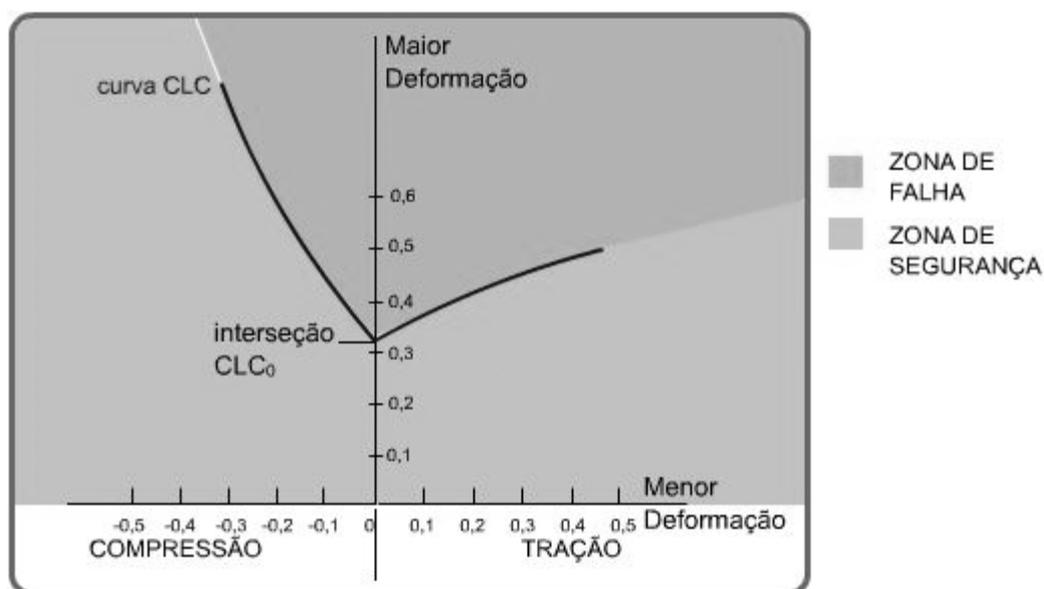


Fig. 4.8 – Curva típica CLC para aço.

Admitindo-se que a curva representa os valores possíveis das combinações de deformação do corpo de prova que apontam sinais de início de ruptura, a curva pode ser interpretada como uma fronteira entre regiões de falha e segurança. A região acima da curva é a região de falha ou ruptura. A região abaixo da curva representa a região de segurança.

Para as possíveis combinações de deformações, cabe observar que com ambas as deformações principais positivas, tem-se maior distribuição das deformações e a estricção se torna mais difusa (sendo importante se ter altos valores de  $n$ ), enquanto que no caso de se ter uma deformação principal fortemente positiva e outra fortemente negativa, há a tendência de se ter uma compensação, e a deformação ao longo da espessura é pequena. Esta situação é mais próxima da estampagem profunda. Por sua vez, quando uma das deformações principais no plano da chapa se aproxima de zero, a estricção é menos difusa e há o afinamento da chapa (devido à conservação de volume).

Para a maioria dos aços carbono, a CLC tem a mesma forma da figura 4.8. Entretanto a posição da curva sobre o eixo vertical depende da espessura da chapa e do valor de  $n$  (coeficiente de encruamento). A interseção da curva com o eixo vertical  $CLC_0$ , que representa o estado plano de deformações é o ponto de mínimo da

curva e tem valor igual a  $n$  no limite (extrapolado) de espessura zero. O ponto de interseção sobe em proporção linear à espessura, até o valor de 3mm.

A taxa de aumento é proporcional ao valor  $n$  até  $n=0,2$ , como mostrado na figura 4.9. Além deste limite, aumentos adicionais de espessura ou de  $n$  têm pouco efeito na posição da curva.

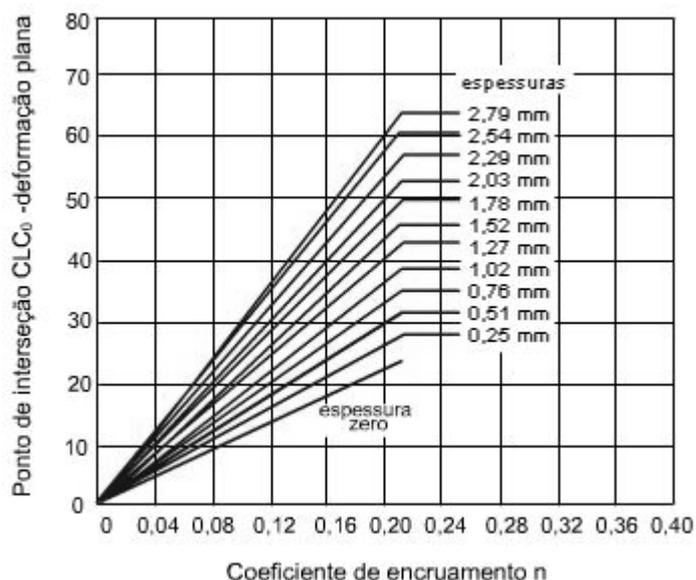


Fig. 4.9 – Comportamento da interseção da curva CLC com o eixo vertical em função do coeficiente de encruamento

#### 4.3.1. Determinação da CLC

Na determinação da CLC, nenhum critério geral tem sido aceito. O mais comum é simular os estados desde a condição biaxial de deformação até a condição de tensão de tração uniaxial, através de corpos de prova adequadamente preparados. Nestes corpos de prova, imprimem-se redes de círculos ou quadrados, tangenciando-se mutuamente ou entrelaçando-se, com dimensões rigorosamente determinadas. A figura 4.10 é um exemplo deste tipo de rede.

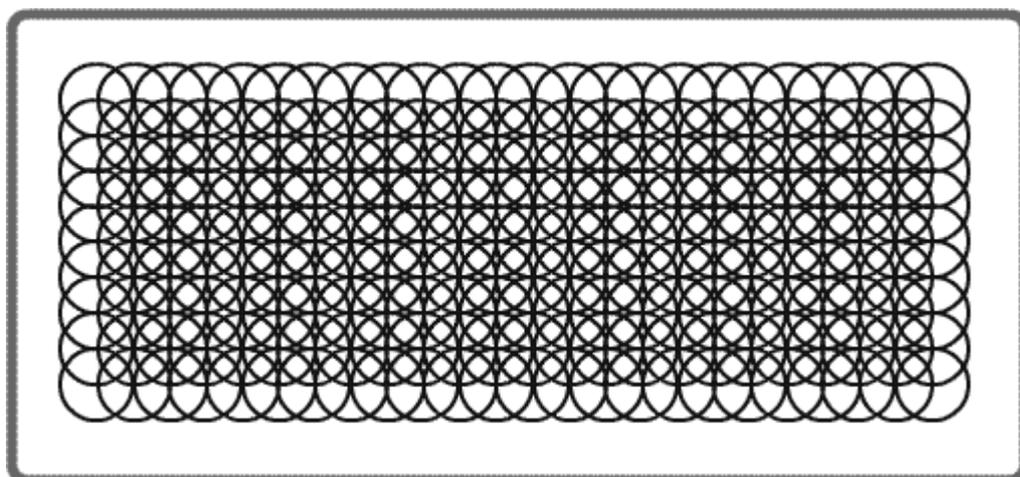


Fig. 4.10 – Exemplo de rede de círculos entrelaçados.

### 4.3.2. Impressão da rede de círculos

Existem vários métodos de impressão das referidas redes, sendo que as técnicas mais comuns são: manualmente, carimbo de borracha, por serigrafia, técnicas fotográficas e ataque eletroquímico.

O método de impressão manual é impreciso, extremamente demorado e caro, além de afetar a formação da estricção. O método do carimbo de borracha é, em geral, impreciso e as marcas apagam-se facilmente.

No método de serigrafia utiliza-se um estêncil contendo a rede a ser impressa e com uma espátula espalha-se a tinta sobre o estêncil que está em contato com o corpo de prova.

Na impressão por técnica fotográfica, o *blank* metálico é atacado por uma solução fotossensível, que é aplicada sobre o mesmo. Seca-se a emulsão por um aquecimento do *blank* a 65 °C por 15 minutos ou, então, por diversas horas, na temperatura ambiente, em sala escura (esta última condição se aplica a materiais facilmente envelhecíveis). O negativo (contendo a rede de círculos) é colocado em contato com o *blank* e, então, exposto a uma forte fonte de luz ultravioleta, durante 1 a 1,5 minutos. Após isto, o *blank* é mergulhado em uma solução reveladora por 30 a 45 segundos, lavada e aspergida com álcool, para que a impressão se torne resistente.

No método eletroquímico, uma almofada ou um rolete é saturado com um eletrólito apropriado (são vários os eletrólitos, sendo que para chapas de aço, é viável

uma solução inibidora de corrosão). Um cabo de um transformador de 10 a 50 A é ligado ao *blank* e o segundo cabo é ligado à almofada, com o eletrólito. Para a marcação em chapas de aço, é usual corrente alternada. Durante metade do ciclo, a superfície da chapa é atacada eletroquimicamente e, na outra metade do ciclo, é depositado um óxido estável. O estêncil (ou tecido especial de fibras aleatórias), contendo a rede a ser impressa, é colocado sobre o *blank*. Umedecendo o estêncil com uma quantidade mínima de eletrólito, garantir-se-á maior uniformidade do ataque e um polimento do metal, eliminando-se os vales criados. A almofada de ataque é então colocada sobre o estêncil e ligada (se ainda não o foi). Aplica-se uma pressão adequada à almofada, tomando-se cuidados especiais para impedir qualquer movimentação do estêncil. Deve-se usar um tempo mínimo, necessário apenas para a impressão da rede de círculos. Este tempo é função da corrente e da potência utilizada no transformador, da área do estêncil e da área da almofada em contato com o estêncil. Após o ataque, o *blank* deve ser lavado, secado e neutralizado (para que não haja prosseguimento do ataque).

#### **4.3.3. Preparação dos Corpos de Prova (CPs)**

Para cobrir todo o espectro de deformações, do típico de estado plano de deformação até o característico de ensaio de tração uniaxial, preparam-se vários corpos de prova (CPs). A simulação dos estados de deformação é obtida com um conjunto de CPs e punções, de geometrias variadas. Alguns autores utilizaram *blanks* elípticos, com um punção hemisférico, outros utilizaram CPs complexos em tração.

Segundo o Centro de Informação Metal Mecânica (CIMM):

- Nakazima usou *blanks* retangulares que variam a sua largura, desde 180 x 180 mm até 180 x 40 mm, com punção hemisférico, cujo raio é 50 mm, e abertura da matriz 106 mm, raio de concordância do prensa-chapas igual a 10 mm.

- Marciniak utilizou CPs que variam sua forma, desde um disco até um CP que se aproxima bastante de um CP padronizado para ensaio de tração uniaxial, com a diferença que aqui a diminuição de seção (para a concentração de tensões e para evitar contato com o prensa-chapas ao longo de toda a periferia do CP) é feita com um arco de círculo - com raios variáveis -, punção cilíndrico de fundo plano

- Keeler e Backofen utilizaram discos de 8 polegadas de diâmetro, com três formas diferentes de punção: um hemisférico, com 2 polegadas de diâmetro; outro hemisférico, com 1 polegada de diâmetro e o terceiro elíptico, com eixo maior medindo 4 polegadas e eixo menor medindo 2 polegadas. Keeler e Backofen ainda variaram as condições de lubrificação: em um grupo de materiais, não foi utilizado nenhum tipo de lubrificação, apenas os CPs foram lavados com água e sabão, seguindo-se a secagem com acetona; para outro grupo, utilizaram um filme de teflon entre o punção e o CP.

- Giordano et al. utilizaram corpos de prova segundo o método de Nakazima, com comprimento constante e igual a 90 mm e largura de 90, 80, 70, 65, 60, 55, 45, 35 e 25 mm.

- Ahrndt et al. utilizaram CPs análogos aos feitos por Nakazima. Contudo, foi verificado por estes pesquisadores que, particularmente nos CPs estreitos e de materiais mais resistentes ou mais espessos, é freqüente a fratura ocorrer fora da sua parte útil, invalidando o ensaio. Então, propuseram CPs (que denominaram "tipo Nakazima diferenciado"), onde se fizeram entalhes circulares.

#### **4.3.4. Construção da CLC**

Uma vez realizada a prensagem dos corpos de prova, a rede de círculos deforma-se, convertendo-se em uma rede de elipses, função do estado de deformação dado, como esquematizado na figura 4.11.



Fig. 4.11 – Elipses possíveis após a deformação: tipo I (fraturada, ou seja, a fratura passa pela elipse), tipo II (afetada pela fratura ou estriçada) ou tipo III (aceitável, a elipse encontra-se fora da área estriçada ou fraturada).

A figura tipo I mostra o caso em que as duas deformações principais contidas na chapa são positivas, induzidas pela pressão do prensa-chapas em toda a borda do *blank* (situação mais próxima do estiramento, uma vez que para que o volume permaneça constante, obrigatoriamente, a deformação ao longo da espessura é negativa).

A figura tipo III mostra o caso em que uma deformação principal é positiva e outra é negativa, conseguindo através de um formato adequado do CP, que permite que a pressão do prensa-chapas seja somente em uma parte do *blank* e maior concentração de tensões na região central do CP. Esta situação é mais próxima da estampagem profunda, pois agora a deformação ao longo da espessura é próxima de zero.

A filmagem ou fotografia da rede distorcida, ao longo do ensaio, permite que as medidas das deformações e a detecção do início da estrição sejam possíveis. Com um projetor de perfil, analisador de imagem ou mesmo com uma régua impressa em material adequado (por exemplo, papel de transparência para retroprojetor), fazem-se as medidas dos eixos maior e menor da elipse onde iniciou-se a estrição. Sejam  $D_1$  e  $D_2$  estes valores, respectivamente. Sendo  $D_0$  o valor do

diâmetro original da rede de círculos, as duas deformações principais maior e menor, no plano da chapa, são dadas pelas equações abaixo, respectivamente:

$$\epsilon_1 = \ln (D1/D0)$$

$$\epsilon_2 = \ln (D2/D0)$$

É comum ter-se razoável espalhamento dos resultados, necessitando-se assim de um tratamento estatístico dos mesmos. Isto implica na necessidade de fazer-se um número razoável de réplicas de um mesmo ensaio. Algumas das possíveis causas de espalhamento dos resultados são a imprecisão no desenho da rede, a imprecisão no método adotado de medida das deformações e a anisotropia da chapa metálica.

Assim, a seqüência de passos para a determinação da CLC é a seguinte:

- a) Deve-se estampar um CP de cada tipo de *blank*, até que a fratura ocorra ou, segundo outro critério, como o início da estricção;
- b) Determinam-se as deformações principais  $\epsilon_1$  e  $\epsilon_2$ , conforme as equações apresentadas, juntamente com os procedimentos recomendados acima;
- c) Traça-se a curva de  $\epsilon_1$  versus  $\epsilon_2$ , obtendo-se assim a CLC para o início da estricção.

## 5. ESTABELECIMENTO DA NECESSIDADE

“As soluções para o problema técnico da transformação do atrito de arraste em atrito de rolamento, para facilitar o deslocamento de objetos pesados, tiveram uma evolução histórica que pode ser sintetizada em dois momentos: o da utilização de elementos cilíndricos (como troncos de árvore), para sobre eles fazer deslizar os objetos, e o da descoberta da roda.

O que basicamente distingue a roda do sistema de elementos cilíndricos, do ponto de vista mecânico, é o eixo: este é fixo, ou seja, não gira, permanecendo solidário ao corpo que se pretende deslocar, e suporta todo o peso, transferindo-o ao terreno por meio da parte móvel da roda, isto é, o disco ou aro. A função dessa ‘máquina’ é transferir o atrito de arraste da zona de contato com o terreno (onde surge então o atrito de rolamento) para uma zona bastante menor, representada pelo eixo, onde se tem velocidades relativas muito menores, pois são proporcionais ao raio da roda. Além disso, no eixo fica bem mais fácil obter as condições para reduzir o atrito de arraste: na pequena área de contato entre o eixo e sua sede, a adoção de superfícies duras e lisas e, sobretudo, a possibilidade de lubrificação determinam que a força necessária para fazer girar a roda seja extremamente menor que a exigida para fazer deslizar a roda sobre o terreno. Isso só não é verdade quando o atrito de rolamento entre roda e terreno tende a anular-se, ou quando o atrito de arraste sobre determinada superfície é baixíssimo (efeito de aquaplanagem ou marcha sobre gelo).

A resistência que uma roda opõe ao avanço deve-se, além dos atritos em relação ao eixo, ainda ao atrito de rolamento, que teoricamente depende apenas do diâmetro da roda: quanto maior o diâmetro, menor o atrito. Mas na prática não é bem assim: de fato, a zona de contato entre uma superfície plana e um disco somente em teoria é uma reta paralela ao eixo de rotação; na realidade, como os materiais em contato não são perfeitamente rígidos, cria-se sempre um achatamento mais ou menos extenso na zona de apoio (chamada ‘área de contato’), sobre a qual se distribui a carga vertical. Assim, a formação da área de contato supõe sempre uma deformação (da roda, do terreno ou de ambos), e para produzi-la sempre se faz necessário certo trabalho. Durante o movimento seguem-se deformações sucessivas, em parte permanentes (o solo se achata) e em parte elásticas (a roda de borracha se

flexiona quando está sob carga, mas depois readquire a forma original). Em qualquer caso, durante o movimento apenas uma parcela de energia despendida para formar a área de contato é restituída; outra parcela dissipa-se sob a forma de calor (fenômeno chamado ‘histerese’); portanto, esse trabalho deve ser continuamente fornecido para fazer rodar a roda, e equivale à resistência ao rolamento.

Ao longo do movimento há uma desigual distribuição das pressões sobre a área de contato, cuja resultante está sempre na parte anterior da área, no sentido do movimento. Tal resultante origina um momento frenante, em relação ao eixo da roda, que representa a força a ser aplicada para mover a roda, força esta que depende do peso incidente sobre a roda, do diâmetro desta, da velocidade do veículo e da natureza dos materiais (borracha e terreno) que se comprimem na área de contato” (ENCICLOPÉDIA DO AUTOMÓVEL, 1974, p.1721).

“Desde suas primeiras aplicações em veículos, a roda sofreu uma evolução predominantemente estilística, em obediência aos cânones estéticos das várias épocas. Do ponto de vista estrutural, permaneceu por longo tempo inalterada: a roda de madeira com raios (figura 5.1), muitas vezes com a superfície de rolamento e o cubo reforçados por aros metálicos. Somente depois de 1843, em seguida à invenção do processo de vulcanização da borracha, começaram a montar-se anéis de borracha maciça em lugar do aro metálico, de modo a absorver os pequenos choques e vibrações gerados pela irregularidade do terreno. Tal solução perdurou até os primeiros decênios do século XX, apesar de que já se iniciara em 1885 a produção de pneumáticos: estes, no início, devido ao alto ciclo de histerese, aqueciam-se demais a altas velocidades. Houve, por isso, um estágio intermediário, representado pelas rodas semipneumáticas, nas quais o aro de borracha possuía uma cavidade interna chamada ‘câmara de ventilação’. Com os aperfeiçoamentos introduzidos na produção da borracha vulcanizada, em pouco tempo as rodas pneumáticas revelaram-se as únicas capazes de absorver adequadamente os choques provocados pelas asperezas da pavimentação.

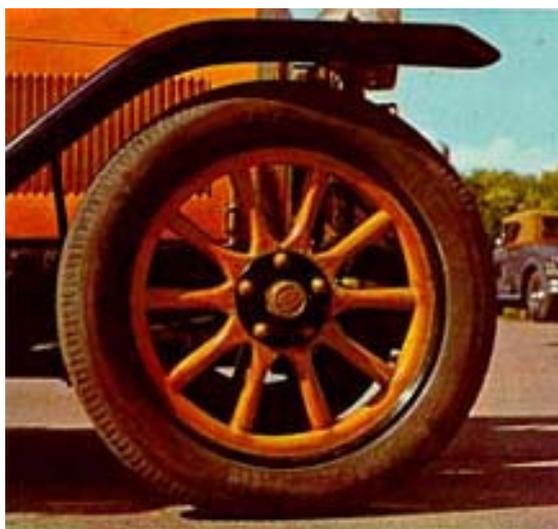


Fig. 5.1 – Roda com aros de madeira

No início da década de 10 introduziram-se as rodas de raios metálicos (figura 5.2) que, por serem construídas em duas partes (roda propriamente dita e cubo fixo), permitiam rápida substituição, reduzindo assim os incômodos devidos a furos nos pneus. Seguiram-se interessantes tentativas de simplificar a produção, com rodas integralmente metálicas como a Sankey, constituída de duas partes em chapa de aço estampada, unidas entre si de modo a formar uma roda com raios.



Fig. 5.2 – Roda com aros de metal coberta de borracha

Foi de fundamental importância o aparecimento, em 1914, das primeiras rodas a disco, construídas por Michelin na França. Em razão do menor preço,

suplantaram rapidamente as rodas de raios, mas permaneceram prerrogativa dos carros esportivos. A solução de Michelin revelou-se totalmente válida, a ponto de não mais ser abandonada; mesmo as rodas atuais consistem num aro metálico, de forma cônica para melhor suportar as solicitações transversais, soldado ou aparafusado na sede.

As rodas em liga leve apareceram pela primeira vez no Bugatti tipo 35 que disputou o GP da França de 1924; a inovação suscitou interesse pelas indiscutíveis vantagens garantidas pelo menor peso (redução do momento de inércia e das massas não suspensas), mas não teve desenvolvimento imediato, por causa do alto custo e da relativa fragilidade. Os primeiros a adotá-las de modo definitivo foram os americanos, nos inícios da década de 50; na Europa, elas foram empregadas pela Lótus (1957) e pela Cooper (1958). Em 1963 a Ferrari adotou-as em seus monopostos e, no ano seguinte, nos carros de série. Daí em diante, a solução se consagrou, difundindo-se para quase todos os tipos de carro de turismo.

As rodas de raios constituem-se de um aro ligado ao cubo por duas ou três séries de tirantes metálicos colocados em tensão por parafusos apropriados. Dispõem-se os raios tangencialmente segundo superfícies cônicas de concavidades contrapostas, de modo a poder transmitir esforços tanto longitudinais (de tração e frenagem) quanto transversais. Essa estrutura oferece vantagens como a elasticidade da roda e a ventilação dos freios. Mas a construção e o acabamento são muito caros; além disso, os raios exigem regulagem periódica de tensão. Essas desvantagens, mais a impossibilidade de se usarem aros muito largos (difundidos nos mais velozes carros modernos), determinaram o abandono de tal solução, em favor das rodas a disco.



Fig. 5.3 – Roda com disco de metal de 1957

As rodas a disco (figura 5.3) possuem um aro, com canal soldado ou aparafusado a um disco estampado, com perfil próprio para aumentar a rigidez e a resistência às solicitações transversais. O aro, em chapa de aço extra-doce, tem espessura de 3 a 5mm; sua parte central é ondulada e mais espessa na zona de fixação ao disco, com finalidade de aumentar a resistência e impedir um contato completo entre disco e aro. Isto permite uma reação elástica do disco sobre os parafusos de fixação (em número variável de três a cinco) para compensar um eventual afrouxamento causado pelas flexões e vibrações da estrutura. Muitas vezes o aro apresenta uma série de furos, cuja função, além de determinar certa redução do peso, é criar durante a rotação um fluxo de ar axial para a refrigeração dos freios. Trata-se do tipo mais difundido de roda, por suas qualidades de resistência, durabilidade e baixo custo.



Fig. 5.4 – Roda em liga leve da década de 70

As rodas fundidas em liga leve (figura 5.4) são apreciadas sobretudo pelo melhor aspecto estético, devido à possibilidade de fazê-las com a forma desejada. Mas têm inegáveis vantagens também do ponto de vista dinâmico, contrabalançadas por uma séria desvantagem: o alto preço. Em geral, sua estrutura é de raios (trapezoidais, para tornar mais robusta a zona de fixação e mais leve a parte externa) dotados de nervuras de enrijecimento. Permitem uma considerável redução de peso, que gera a diminuição das massas não suspensas, fato extremamente vantajoso do ponto de vista do comportamento na estrada e do grau de solicitações que o pneumático sofre durante suas vibrações de alta frequência. Permitem também a

redução do momento de inércia, o que reduz notavelmente o efeito giroscópico verificado durante o esterçamento e durante as variações de camber a alta velocidade.

No projeto de um veículo, um dos problemas a enfrentar é o do diâmetro das rodas. No passado as rodas de automóveis tinham em geral grandes diâmetros, o que servia para reduzir a sensibilidade às irregularidades das péssimas estradas de então. Atualmente, o fator determinante na escolha do diâmetro das rodas, além do tipo de terreno sobre o qual deverão andar, é o peso do veículo” (ENCICLOPÉDIA DO AUTOMÓVEL, 1974, p.1723 e 1724).

“De qualquer modo, a melhoria geral do estado das estradas levou a uma redução do diâmetro das rodas, o que acarreta consideráveis vantagens: permite reduzir o peso das rodas e, portanto, o valor das massas não suspensas. Isso favorece o comportamento na estrada, a redução do momento de inércia (permitindo acelerações maiores com o mesmo torque motriz), a obtenção de relações de transmissão (engrenagens do câmbio e da redução final) e de árvores mais leves, isto em virtude da menor relação de redução necessária entre a velocidade de rotação do motor e das rodas. (De fato, a igual velocidade, a roda menor gira mais rapidamente e, portanto, sua velocidade de rotação é mais próxima à do motor.)

A redução de diâmetro tem limites na possibilidade de carga dos pneumáticos e nas dimensões dos freios, quando estes são colocados diretamente nas rodas. A esse propósito, vale lembrar como a passagem dos grandes freios a tambor aos bem menores e mais eficientes freios a disco permitiu notável redução do diâmetro do aro (...). Além disso, as rodas menores determinam certa vantagem quanto ao custo do pneu e à menor sensibilidade aos desequilíbrios tanto estáticos quanto dinâmicos. Mas é importante notar, por outro lado, que o pneu de menor diâmetro, por cumprir maior número de rotações num mesmo percurso, está sujeito a maior desgaste” (ENCICLOPÉDIA DO AUTOMÓVEL, 1974, p.1724).

As rodas estampadas em aço em produção pela General Motors do Brasil são constituídas de duas partes: o aro e o disco (figura 5.5).

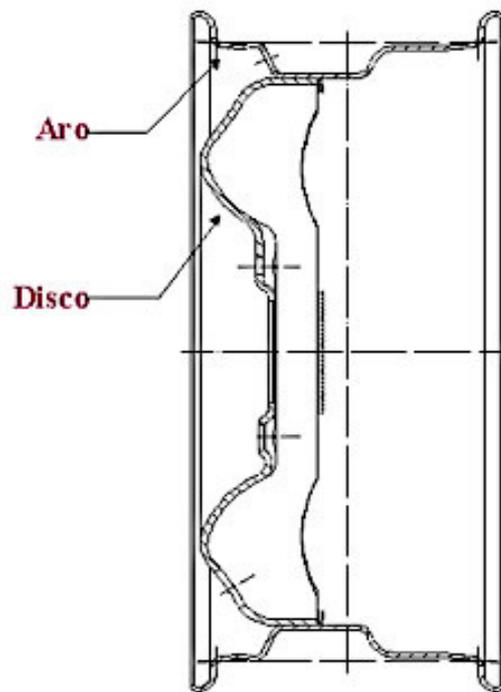


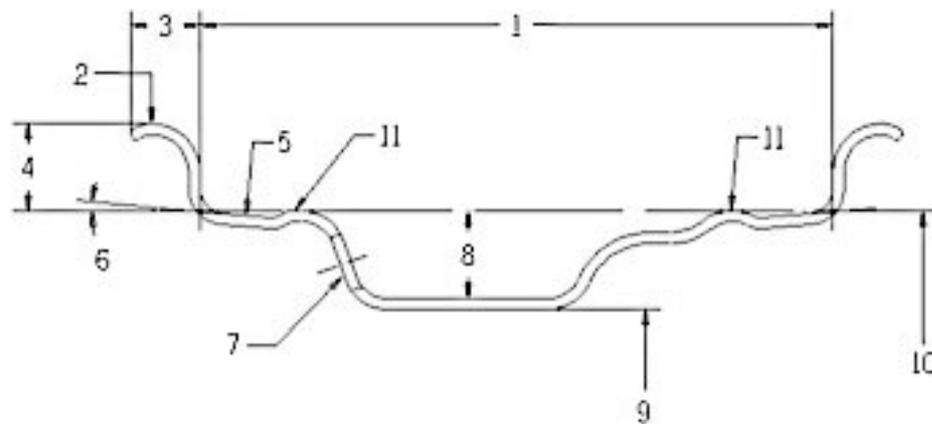
Fig. 5.5 – Composição da roda de disco

Segundo a Associação Latino-Americana de Pneus e Aros (ALAPA), aro é o elemento anelar da roda fixado ao disco, ou montado sobre o cubo raiado (aro desmontável) ou, ainda, parte integrante da roda (roda fundida), sobre o qual se assentam os talões do pneu, proporcionando a montagem do conjunto (figura 5.6). Perfil do aro é a linha do contorno externo, determinada pela sua seção transversal.



Fig. 5.6 – Nomenclatura para os elementos da roda (fonte: ALAPA)

Ainda segundo a ALAPA, a dimensão do aro é definida em sua designação por dois números, sendo que o primeiro número indica a largura do aro em polegadas, seguido (quando for o caso) de letras que identifiquem o tipo de perfil do aro, e o segundo número indica o diâmetro nominal em polegadas, seguido (quando for o caso) de letras que identifiquem o tipo de *hump* utilizado (figura 5.7). *Hump* é uma saliência que pode existir no perfil do aro, em toda sua circunferência, na região do assento cônico, que dificulta o detalonamento dos talões do pneu.



### Nomenclatura

1 - Largura do aro ( L )	6 - Ângulo do assento cônico
2 - Flange do Aro	7 - Furo ou Rasgo para válvula
3 - Largura do flange ( LF )	8 - Profundidade do rebaixo ( PR )
4- Altura do flange ( AF )	9 - Diâmetro interno do Aro ( DL )
5 - Assento cônico	10 - Diâmetro nominal do aro ( D )
	11- Hump

Fig. 5.7 – Nomenclatura para o perfil do aro (fonte: ALAPA)

“O material mais comumente empregado para a produção dos aros é o aço que, a partir de fitas de determinada espessura e largura, é enrolado e cortado no necessário comprimento, soldado, submetido a diversas operações até ficar com o perfil desejado, acabado e finalmente furado no lugar da válvula” (ENCICLOPÉDIA DO AUTOMÓVEL, 1974, p.1724).

O disco de roda possui o formato de um prato flangeado e, por sua vez, não é normatizado, nem segue especificações de qualquer instituição. Suas características são determinadas no projeto, de maneira que atenda às condições de serviço. Uma roda deve possuir resistência suficiente para suportar as cargas impostas sobre ela, sejam axiais ou radiais. Além disso, deve ser resistente a danos acidentais e estruturalmente rígida o suficiente para minimizar a flexão quando o veículo realizar uma curva.

A roda estampada é fabricada a partir da soldagem do disco e do aro. Essa união não é contínua, mas sim interrompida por uma série de entalhes de ventilação igualmente espaçados que, em conjunto com os furos de ventilação (e redução de

peso) localizados na parte plana do disco, induz um fluxo de ar sobre o conjunto de freio, minimizando a transferência de calor deste para o pneu.

Segundo o Manual de tecnologia automotiva (2005), cubos ou calotas decorativas removíveis são fixadas à roda através de elementos elásticos ou parafusos, principalmente para melhorar a aparência das rodas estampadas em aço, obtendo também efeitos adicionais, como redução do coeficiente de arrasto aerodinâmico ou melhor ventilação da roda, reduzindo a temperatura do rolamento e do sistema de freio. O plástico predomina como material para calotas, mas há também casos onde são empregadas chapas de alumínio ou aço inoxidável.

Ainda segundo o Manual de tecnologia automotiva (2005), os critérios de projeto para rodas de automóveis de passageiros incluem alta resistência estrutural, resfriamento eficiente dos freios, fixação confiável, excentricidade mínima, pouca necessidade de espaço, boa proteção anticorrosiva, pouco peso, baixo custo, facilidade para montagem do pneu, bom assentamento do pneu, estética atraente e baixo coeficiente de arrasto aerodinâmico.

Quanto às características específicas das rodas em aço estampado, devido a seus parâmetros funcionais e processos de fabricação, o material escolhido deve principalmente possuir, descrito de forma apenas qualitativa, alta resistência à fadiga, boa estampabilidade, boa soldabilidade e alta resistência à corrosão. Além disso, essas propriedades não podem sofrer grandes alterações causadas por altas temperaturas.

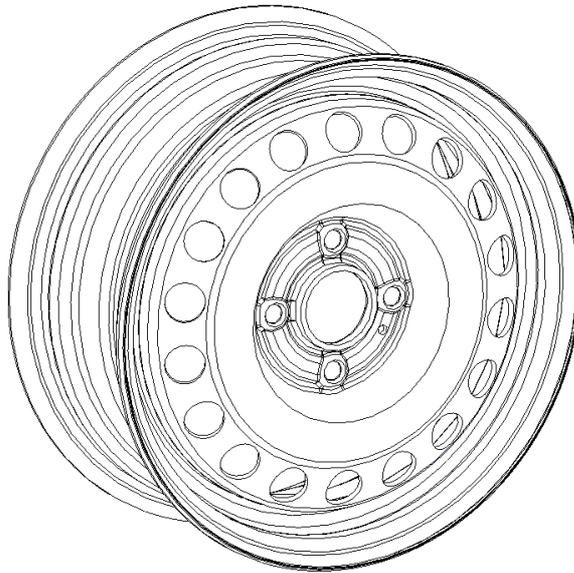


Fig. 5.8 – Esboço de roda a disco atual

As rodas em aço estampado utilizadas pela General Motors do Brasil (figura 5.8) são fornecidas por duas empresas: Arvin Meritor e Borlem. Para este trabalho escolheu-se como referência a roda 5½ J x 14, devido a sua larga utilização nos veículos da General Motors do Brasil, modelos Celta, Prisma, Corsa e Meriva, além de também ser utilizada como roda sobressalente em outros veículos. A escolha desta roda em particular está baseada em um critério econômico. Como deverão ser avaliados os custos de produção, alterações em ferramental e processos serão mais facilmente justificadas economicamente considerando-se um produto de larga escala. É o caso desse modelo de roda, do qual a General Motors do Brasil compra anualmente mais de 610 mil unidades da Arvin Meritor e mais de 550 mil unidades da Borlem. As características e indicadores de desempenho dessas rodas serão os parâmetros para o desenvolvimento deste projeto.

## 5.1. Avaliação competitiva do mercado

Para uma análise do posicionamento das rodas utilizadas pela General Motors do Brasil em relação a sua massa, fez-se uma avaliação dos produtos similares oferecidos no mercado brasileiro e de alguns dos chamados mercados emergentes, como Índia e leste europeu. A oferta dessas rodas estampadas em aço está vinculada ao fabricante e ao modelo do veículo, sendo portanto discriminada de forma correspondente (figura 5.9).

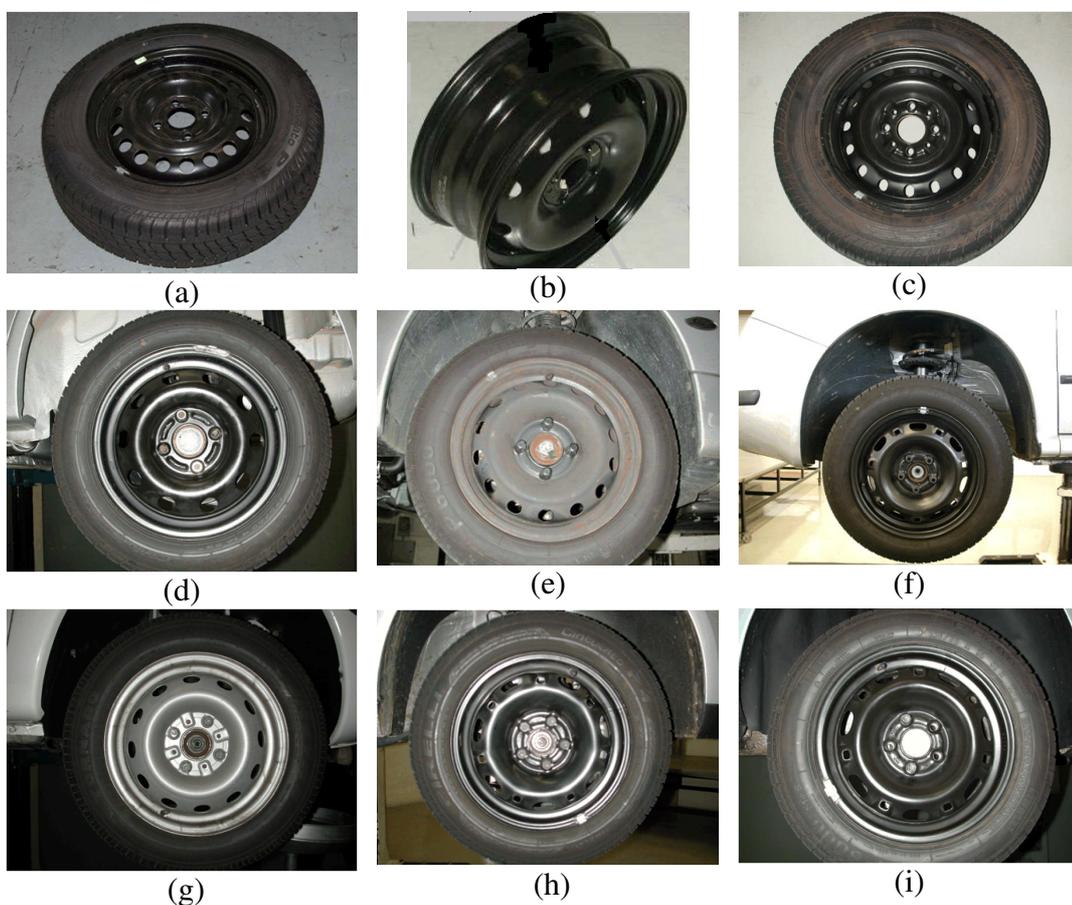


Fig. 5.9 – Rodas estampadas em aço do mercado atual. (a) Chevrolet Corsa, (b) Dacia Logan, (c) FIAT Palio, (d) Ford Fiesta, (e) Peugeot 206, (f) Skoda Fabia, (g) Tata Indigo, (h) Volkswagen Fox, (i) Volkswagen Polo.

Os dados pertinentes à avaliação estão contidos na tabela 5.1.

Tab. 5.1 – Fabricante, modelo e ano do veículo, tipo de pneu, tipo de roda e massa da roda estampada em aço dos veículos avaliados.

<b>Fabricante</b>	<b>Modelo</b>	<b>Ano</b>	<b>Pneu</b>	<b>Roda</b>	<b>Massa (kg)</b>
Chevrolet	Corsa Sedan 1.0	2003	165/70 R14	5,5 x 14	7,70
Dacia	Logan 1.6L	2005	R15		7,70
FIAT	Palio ELX 1.0	2004	165/70 R13	5 x 13	5,25
Ford	Fiesta 1.0 Supercharger	2003	175/65 R14	5,5J x 14	7,15
Peugeot	206 1.0 Soleil	2001	175/65 R14		7,50
Skoda	Fabia Comfort 1.4	2001	186/60 R14		7,30
Tata	Indigo 1.4	2004	175/65 R14		7,45
VW	Fox Flex 1.0	2004	175/65 R14	5 x 14	6,70
VW	Polo Sedan 1.6	2003	185/60 R14	6J x 14	7,50

Os dados referentes à massa das rodas podem ser melhor comparados através do gráfico da figura 5.10, pelo qual nota-se que o veículo Chevrolet Corsa da General Motors do Brasil possui as rodas mais pesadas dentre todos os veículos com rodas de aro 14 polegadas avaliados.

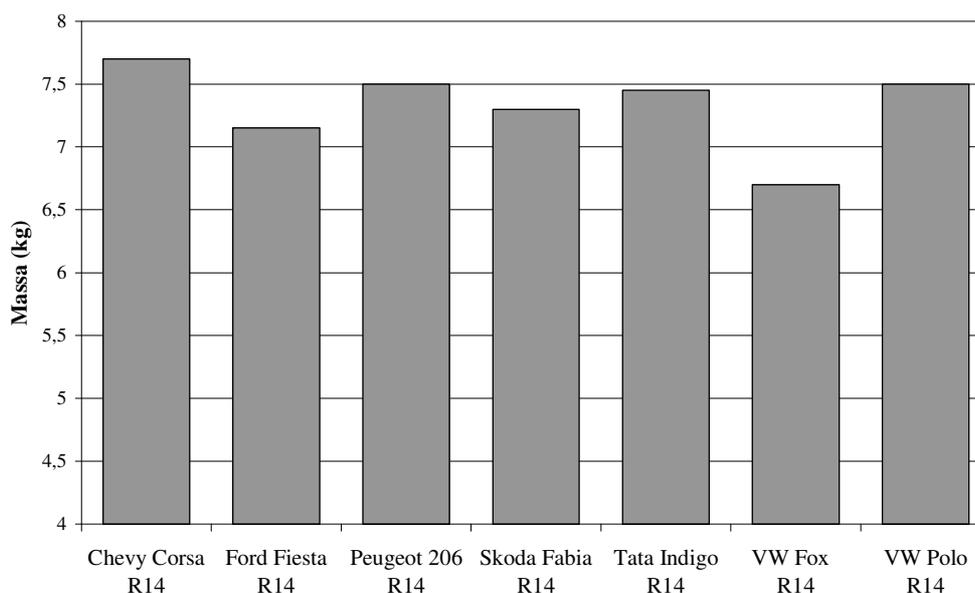


Fig. 5.10 – Comparação das massas das rodas aro 14 dos veículos avaliados

Outra comparação que deve ser feita é entre as rodas dos veículos Chevrolet Corsa e Dacia Logan, visto que esta, mesmo com aro de 15 polegadas, tem a mesma massa que aquela, de aro 14 polegadas.

Realizando agora uma comparação entre rodas com aro de 13 polegadas, constata-se que as rodas 5 x 13 utilizadas no veículo FIAT Palio possuem em massa cerca de 500 gramas a menos que as rodas 4,5J x 13 utilizadas no veículo Chevrolet Celta.

## **5.2. Necessidades declaradas *versus* necessidades reais**

“Existe uma grande diferença entre as necessidades que os clientes ou usuários declaram ter e as que eles realmente têm. O cliente pode declarar suas necessidades em termos dos produtos que deseja comprar. Entretanto, suas necessidades reais são normalmente os serviços que aqueles produtos podem prestar” (KAMINSKI, 2000, p.27).

Um caso típico relacionado ao tema deste trabalho é o desejo dos consumidores por rodas de dimensões maiores, ou de liga leve (alumínio), ou ambos. Desse grande número de pessoas, apenas uma pequena parcela tem verdadeira noção das vantagens e desvantagens desses tipos de rodas, fazendo uma escolha consciente. A grande maioria apenas tem real necessidade de uma roda que denote *status*, poder econômico e beleza estética, mesmo que, muitas vezes, uma roda de aço ou com dimensões menores traga mais benefícios do que as rodas de grandes aros e/ou fabricadas com liga leve.

Uma pesquisa realizada pelo Burke Group Market Study em 2001 com consumidores nos Estados Unidos (fonte: *American Iron and Steel Institute*) revela que os compradores não se importam com o material das rodas de seus veículos, apenas com sua aparência. Assim, novas técnicas de projeto e fabricação das rodas de aço estão permitindo sua expansão no mercado, devido à pesquisa de acabamentos que mimetizam as ligas de alumínio.

### **5.3. Necessidades culturais**

Necessidades culturais “são exigências devidas aos padrões culturais do indivíduo. Toda sociedade humana desenvolve um padrão de crenças, hábitos, práticas etc. Tais padrões fornecem à sociedade certos elementos de estabilidade: sistema de leis, explicação de mistérios, costumes, tabus, símbolos de status e assim por diante. Esses elementos são vistos pela sociedade como possuidores de valores importantes, havendo inclusive uma expressão para essas posições: o *politicamente correto*. Qualquer mudança proposta torna-se uma ameaça a esses valores importantes e, assim, enfrentará resistência até que a natureza da ameaça seja entendida” (KAMINSKI, 2000, p.28).

“É importante notar que essas necessidades estão ligadas aos costumes da sociedade em questão e podem mudar de um país para outro. Este é inclusive um fator de fracasso de vários produtos que são sucesso num determinado país mas que não têm o mesmo sucesso em outros por não terem sido levadas em conta as mudanças culturais” (KAMINSKI, 2000, p.28).

Além da preferência pelas rodas com grandes aros e acabamento das ligas leves de alumínio ou cromadas, como ocorre nos países ocidentais, nos grandes centros do Brasil existe uma cultura curiosa entre os condutores jovens, principalmente, que implica na utilização das rodas estampadas em aço pintadas com a cor negra desacompanhadas das calotas de plástico. Erroneamente poder-se-ia pensar que tal prática é devida somente à tentativa de evitar o furto das calotas, mas na verdade essa parcela dos consumidores busca uma estética diferenciada.

### **5.4. Necessidades implícitas**

“A necessidade pode não existir de forma aparente, mas sim estar latente e evidenciar-se quando os meios para satisfazê-la se apresentarem. O espírito empreendedor da empresa pode, por exemplo, oferecer novos produtos que não existiam até então. Ou seja, o cliente não tinha essa necessidade pelo simples fato de o produto não existir” (KAMINSKI, 2000, p.28).

No caso específico do presente trabalho, uma inovação tecnológica ou estilística acompanhada de uma estratégia de *marketing* adequada pode inspirar a criação de uma necessidade para os clientes, especialmente se essa inovação denotar estética ou desempenho.

### **5.5. Necessidades percebidas**

“A percepção que o cliente tem do produto pode diferir da percepção do fabricante. Alguns fabricantes tiram proveito disso aceitando e agregando valores aos produtos. É o caso de algumas lojas de grifes, em que a marca pode representar uma grande diferença no preço do produto em relação a um similar de qualidade equivalente. Em casos como esse, o fabricante se ajusta a fim de satisfazer a necessidade percebida do cliente, o que não necessariamente requer mudanças no projeto ou na produção. Muitas vezes, apenas uma mudança superficial (geralmente estética) é suficiente” (KAMINSKI, 2000, p.28 e 29).

Para o produto objeto deste trabalho, o fenômeno descrito acima é passível de ocorrer, caso as modificações no produto elevem a percepção do cliente. O caminho mais fácil para tal consiste de melhorias na estética das rodas estampadas em aço.

## 6. ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA DA NECESSIDADE

“Antes de iniciar o estudo de soluções (levantamento de alternativas), é necessário que o problema a ser atendido pelo produto esteja totalmente identificado e formulado. Combinando a tecnologia com as exigências do projeto e necessidades de clientes, procura-se formular o problema em termos técnicos. Só após o problema estar formulado com precisão suficiente é que se passa a pensar nas soluções. A especificação das características técnicas do projeto será um conjunto de requisitos funcionais, operacionais e construtivos a ser atendido pelo produto” (KAMINSKI, 2000, p.31).

Como descrito anteriormente neste relatório, os parâmetros de referência para este projeto serão as características de função e desempenho das rodas atualmente utilizadas pela General Motors do Brasil, devido ao objetivo do trabalho.

Assim, as especificações técnicas do produto são as próprias especificações das rodas atuais, que por questões de confidencialidade, não será possível informar.

Entretanto, existem especificações que podem ser facilmente deduzidas, como a carga estática que a roda deve suportar, equivalente a metade do peso de um veículo. Considerando-se um veículo de uma tonelada, então a carga estática vertical à qual a roda deverá suportar está em torno de 500 quilos.

Existem especificações funcionais e construtivas que também podem ser deduzidas, como critérios de tolerância quanto a montagem do disco e do aro, posição e dimensão dos furos, desbalanceamento máximo da roda e rugosidade da peça.

Para finalizar, existem também especificações que podem ser tanto de caráter interno da empresa quanto normativo, por exemplo os materiais passíveis de utilização na própria peça e no seu processo de fabricação, quer sejam controlados ou recicláveis.

## 7. SÍNTESE DE SOLUÇÕES

Considerando-se todos os parâmetros que foram levantados até este ponto do trabalho, pode-se chegar a uma lista de possíveis alternativas que deverão ser analisadas para verificação quanto à sua viabilidade e capacidade de atendimento da necessidade.

Uma alternativa não exclui a outra, elas podem ser complementares, e um projeto básico pode ser elaborado a partir da conjunção de algumas dessas alternativas, se não de todas. As ferramentas decisivas quanto a isto são as análises de viabilidade das alternativas e a matriz de decisão.

As alternativas que merecem um estudo mais aprofundado são:

- redefinição da geometria das rodas atuais;
- desenvolvimento de rodas de aço no estilo Kühl;
- substituição do material por um aço duplex (*dual-phase*).

### 7.1. Redefinição da geometria das rodas atuais

Com as modernas técnicas de CAD/CAE (*Computer Aided Design/Computer Aided Engineering*), as possibilidades para buscar complexas geometrias para as peças estão em aberto.

Esta é a proposta desta alternativa, realizar estudos sobre o desenho das rodas atuais buscando redução de peso através de análises de posicionamento, tamanho e forma de furos e superfícies da roda.

A geometria resultante deverá ser avaliada quanto a sua capacidade estrutural. Para tanto deverá ser utilizado um Método de Elementos Finitos.

### 7.2. Rodas Kühl

As rodas no estilo Kühl utilizam um sistema de raios de aço delgados, porém profundos, para formar a estrutura entre o cubo e o aro (ver figura 7.1), permitindo adequada resistência aos esforços ao mesmo tempo que provendo redução no peso e desenho vantajoso. Podem ser de raios soldados ou peça central

única estampada. A segunda opção será analisada, devido ao seu menor custo, pois esse processo de soldagem é muito dispendioso.



Fig. 7.1 – Roda Kühhl estampada em aço

Os conceitos iniciais dessas rodas leves foram desenvolvidos na Suíça, em 1997, motivados pela potencial redução de peso comparada com as tradicionais rodas de disco de aço. É prevista uma redução de peso de 10 a 20%, assim como melhorias de projeto devido aos benefícios funcionais dos raios profundos e delgados, que permitem amplas aberturas na roda, capazes de melhorar a refrigeração do sistema de freios e ostentar uma estética diferenciada.

A roda Kühhl pode ser utilizada também com uma capa de funções estéticas, fabricada em plástico, alumínio ou aço inoxidável.

Esse modelo de roda é patenteado nos Estados Unidos e é tema de poucos estudos ainda, o que consiste em uma dificuldade de adoção desta alternativa. Essa verificação será conduzida nas análises de viabilidade, fase posterior deste trabalho.

### **7.3. Aço duplex (*dual-phase steel*)**

Os fabricantes sempre almejavam conciliar os benefícios de custo de produção das rodas estampadas e soldadas com os desenhos mais arrojados das rodas

de liga de alumínio, mas eram barrados por limitações de material. Para obter a resistência à fadiga do alumínio com os aços atualmente utilizados, como o HSLA (*high-strength low-alloy*), era necessário aumentar a espessura do material ao ponto em que a peça tornava-se muito pesada e difícil de estampar.

Nesse cenário surgem os aços duplex, que permitem menores peso e espessura devido a suas características: alta resistência com boa estampabilidade, já que os valores da tensão de escoamento e limite de resistência são distantes, permitindo que a peça sofra estampagem profunda sem romper-se.

Com os raios mais finos que o aço duplex concede às rodas, fica possível a utilização de um acabamento que se aproxima do alumínio cromado, consistindo de uma capa em aço inoxidável ou plástico pintado fixada ao esqueleto da roda.

## 8. ANÁLISE DE VIABILIDADE

As soluções propostas serão analisadas quanto à possibilidade de sua execução, com a finalidade de se determinar quais dessas soluções poderão ser aprofundadas através da elaboração de um projeto.

As soluções serão a seguir analisadas quanto a sua viabilidade técnico-legal, econômica e ambiental.

### 8.1. Viabilidade técnico-legal

As rodas no estilo Kühn foram patenteadas pela empresa Hayes Lemmerz International Inc., líder no mercado mundial de rodas automotivas e proprietária no Brasil da empresa Borlem. As patentes estão registradas no *United States Patent and Trademark Office* (USPTO) sob registro 6042194 de 28 de março de 2000 e na *World Intellectual Property Organization* (WIPO) sob registro WO/2003/011614 de 13 de fevereiro de 2003. Essas patentes praticamente inviabilizam o projeto de uma roda com o mesmo conceito, porém ainda há a possibilidade de negociação para o fornecimento dessas rodas pela Hayes Lemmerz através de contrato.

Quanto à análise técnica, o fato de as rodas da Hayes Lemmerz já estarem sendo utilizadas em veículos de produção, inclusive alguns da General Motors fora do Brasil, comprova que esta alternativa é tecnicamente viável, levando-se em conta a homologação dos produtos.

O aço duplex (*dual phase*) já vem sendo utilizado há algum tempo na fabricação de rodas automotivas no continente europeu, o que atesta a viabilidade técnica desta solução. Esse aço é produzido também no Brasil, e seu fornecimento precisaria ser contratado frente a uma siderúrgica.

A alteração da geometria das rodas é tecnicamente viável visto que a General Motors do Brasil possui todas as ferramentas para a confecção desse projeto, sejam elas os programas de CAD/CAE/CAM (*computer aided design, engineering and manufacturing*) e Análise por Método dos Elementos Finitos, além de usuários capacitados. A produção do novo modelo de roda deverá ser contratada junto aos fornecedores.

## 8.2. Viabilidade econômica

A análise de viabilidade econômica das três alternativas de solução torna-se bastante complexa por se tratar de um produto totalmente manufaturado por fornecedores, sendo que os serviços destes deverão ser contratados após negociação.

A solução de substituição do material por aço duplex (*dual phase*) pode apresentar uma vantagem econômica frente às outras alternativas, visto que pela preservação do desenho atual, existe a possibilidade de que as mesmas matrizes de estampagem continuem sendo utilizadas, poupando um investimento em torno de 500 mil dólares.

O aço duplex é mais caro que os aços atualmente em uso na manufatura das rodas estampadas, como o HSLA (*high-strength low-alloy*). Porém, devido a sua maior resistência à fadiga e conseqüente possibilidade de menores espessuras de chapa, utilizar-se-ia menos material, o que influiria positivamente na redução de custo. Um desafio quanto à aplicação do aço duplex no Brasil ainda é a disponibilidade. Sabe-se que a siderúrgica Usiminas produz aços *dual phase*, mas o volume da produção pode não ser suficiente para mais esta aplicação. Esse problema precisaria ser verificado e acertado junto ao fornecedor.

A viabilidade econômica da alternativa de redesenho da geometria das rodas passa pelo resultado da tentativa de redução de material. Como já foi dito, o investimento para um novo conjunto de matrizes de estampagem está por volta de 500 mil dólares. Como o volume de produção gira em torno de mais de um milhão de unidades anuais, seria necessário um desconto de 50 centavos por unidade a fim de retornar o investimento em apenas um ano.

A alternativa de adoção das rodas Kühl pode ser economicamente viável dependendo das condições do contrato que precisaria ser firmado com a Hayes Lemmerz International Inc. O preço variaria conforme a decisão de produzir as rodas no Brasil ou importá-las e com o volume da produção. Uma vantagem desta alternativa é a possibilidade de substituição de alguns modelos de rodas de alumínio, também, através de uma capa plástica com fins estéticos, que pode ser pintada ou até cromada.

### **8.3. Viabilidade ambiental**

As soluções propostas que envolvem o desenvolvimento de uma roda no estilo Kühl ou a simples redefinição da geometria das rodas atuais, devido ao fato de utilizarem os mesmos materiais e processos de produção atualmente homologados, não apresentam problemas quanto a questões ambientais, podendo ser consideradas ambientalmente viáveis.

De maneira similar, a proposta de substituição do material por aço duplex também não enfrentaria problemas relativos à conservação do meio ambiente, visto que a composição e os processos de fabricação desse aço são destituídos de elementos que infrinjam leis ambientais ou de saúde pública.

## 9. ELABORAÇÃO DAS PROPOSTAS

Como já informado anteriormente, serão elaboradas propostas a partir das alternativas de solução geradas para que, após estudos estruturais mais aprofundados, baseados no método dos elementos finitos, e análises econômicas mais completas, reforçadas por negociação com os possíveis fornecedores, seja possível a seleção da melhor alternativa ou combinação de alternativas para elaboração de um Projeto Básico. Deve-se lembrar que esses estudos não farão parte do presente trabalho.

### 9.1. Redefinição da geometria das rodas atuais

Para buscar uma geometria diferente que apresentasse a possibilidade de redução de massa, fez-se um *benchmarking* das atuais rodas no mercado. Uma geometria que gerou interesse foi a das rodas do veículo Dacia Logan, com um conceito diferenciado. O disco dessa roda possui mais inclinada a superfície da saliência que conecta a região dos furos dos parafusos à superfície dos furos de ventilação, fazendo com que esta última esteja quase paralela ao eixo. Um esboço dessa roda encontra-se na figura 9.1, lado a lado com o conceito aplicado às rodas convencionais.

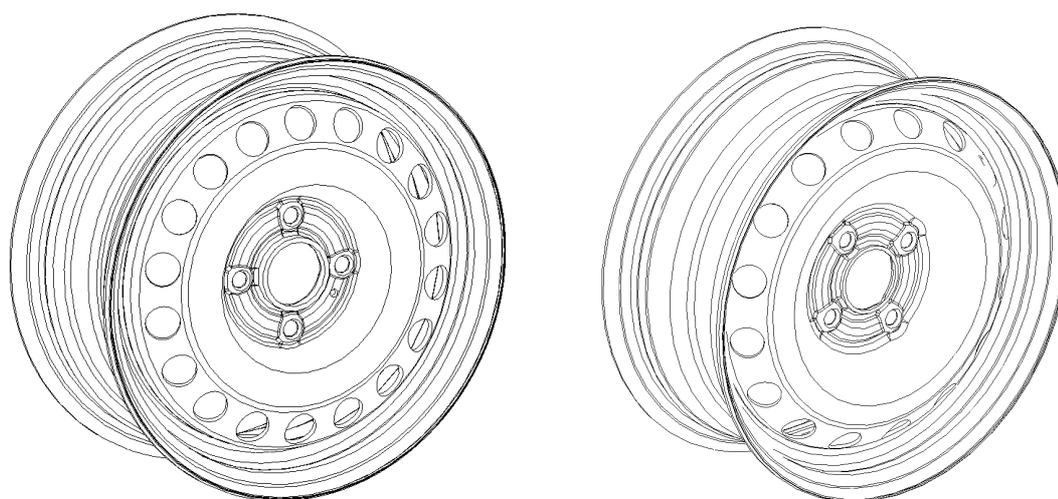


Fig. 9.1 – Esboço de roda convencional (esq.) e com conceito diferenciado (dir.)

Sabe-se que a roda aro 15 polegadas do Dacia Logan possui massa similar (7,700kg) à roda do Chevrolet Corsa.

O procedimento adotado para averiguação deste conceito diferenciado foi a construção de modelos digitais aproximados dos discos das rodas com o uso do programa de CAD (*computer aided design*) Unigraphics NX3, e com auxílio do mesmo checou-se, para uma mesma primeira espessura de chapa, no caso 2,5mm, o volume ocupado por esses discos de roda. Repetiu-se o procedimento para uma segunda espessura (3,5mm) em ambas as rodas. As seções transversais dos modelos digitais construídos estão na figura 9.2 e os resultados estão demonstrados na tabela 9.1.

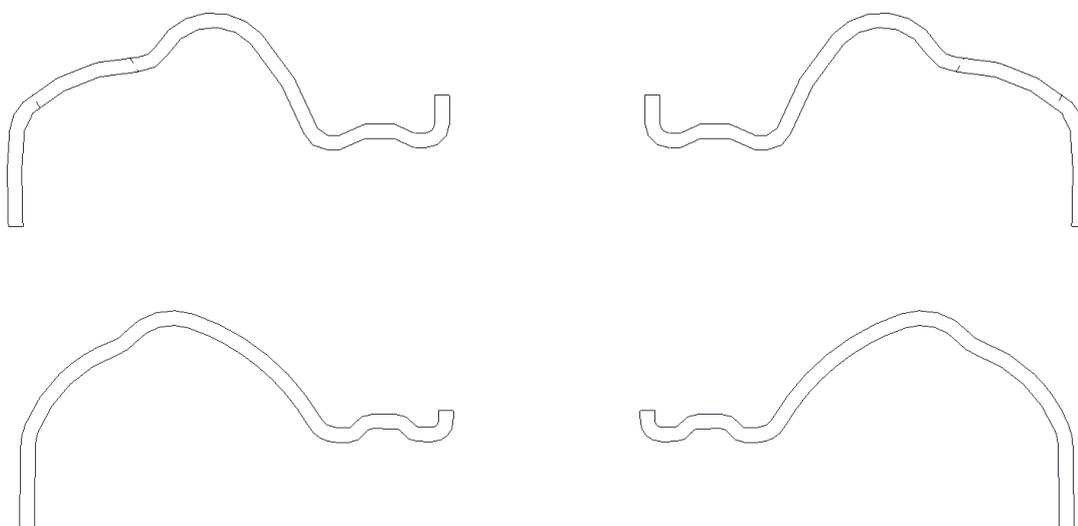


Fig. 9.2 – Seções transversais do modelo digital de roda convencional (em cima) e de roda com conceito diferenciado (em baixo)

Tab. 9.1 – Volumes obtidos para os modelos digitais com espessuras 2,5 e 3,5mm

Modelo digital da roda	Espessura	
	2,5mm	3,5mm
Convencional	Volume = $298 \times 10^3 \text{ mm}^3$	Volume = $420 \times 10^3 \text{ mm}^3$
Diferenciada	Volume = $310 \times 10^3 \text{ mm}^3$	Volume = $438 \times 10^3 \text{ mm}^3$

Pode-se perceber pelos resultados obtidos que não é a forma do disco que influi para a menor massa da roda com conceito diferenciado. Sabe-se que também não é influência da forma do aro, padronizada por normas internacionais.

De fato, as rodas aro 15 polegadas do Dacia Logan, que deveriam ter mais massa que as rodas aro 14 polegadas do Chevrolet Corsa, possuem massa similar devido a menores espessuras de chapa no aro (2,3mm contra 2,7mm) e no disco (3,5mm contra 4,5mm), e não devido a sua forma (ver figura 9.3).



Fig. 9.3 – Roda do veículo Chevrolet Corsa (esq.) e Dacia Logan (dir.) e suas espessuras de chapa

Visto que as rodas do veículo Dacia Logan estão homologadas, ou seja, suportam todas as cargas e impactos a que foram propostas, as conclusões a que se chegou é que ou essas rodas são manufaturadas com um material diferente em relação às rodas do Chevrolet Corsa, talvez até aço *dual phase*, ou então os critérios de projeto das rodas do Chevrolet Corsa são mais rigorosos, levando a uma roda resistente a cargas e impactos maiores, o que acarreta mais massa.

## 9.2. Rodas Kühhl

Como relatado anteriormente, as rodas no estilo Kühhl foram desenvolvidas recentemente e possuem o disco baseado em um sistema de raios de aço delgados, porém profundos, capazes de gerar resistência estrutural equivalente às rodas convencionais.

Este conceito de roda é patenteado pela empresa Hayes Lemmerz International Inc., proprietária no Brasil da empresa Borlem.

É esperada com esta solução uma redução de 10 a 20% no peso das rodas de aço, sendo ainda necessário o acordo do preço da unidade com o fornecedor para verificação da viabilidade econômica.

Apresenta inúmeras vantagens frente às rodas convencionais, destacando-se a possibilidade de substituição também de alguns modelos de roda de alumínio, devido a suas características estéticas e versatilidade de estilo geradas pelos raios delgados e por coberturas plásticas cuja tecnologia de acabamento e revestimento permite que as mesmas mimetizem a estética do alumínio ou do cromo (ver figura 9.4 a 9.7). Nos Estados Unidos, essas rodas acompanhadas da capa plástica ficam em torno de 15 dólares mais baratas que as rodas de alumínio.



Fig. 9.4 – Roda no estilo Kühhl estampada em aço, sem cobertura



Fig. 9.5 – Roda no estilo Kühhl com cobertura pintada (Chevrolet)



Fig. 9.6 – Roda no estilo Kühhl com cobertura pintada (Opel)



Fig. 9.7 – Roda no estilo Kühhl com cobertura cromada (Chevrolet)

Rodas no estilo Kühhl estão sendo introduzidas no mercado desde 2006, inclusive em veículos da General Motors fora do Brasil, como nos modelos Chevrolet Malibu (figura 9.8), Opel Vectra (figura 9.9), Opel Zafira (figura 9.10) e Opel Meriva (figura 9.11).



Fig. 9.8 – Roda no estilo Kühhl com cobertura pintada do Chevrolet Malibu 2006



Fig. 9.9 – Opel Vectra 2006 e sua roda no estilo Kühhl com cobertura pintada



Fig. 9.10 – Opel Zafira 2006



Fig. 9.11 – Opel Meriva 2006

Outras vantagens desse tipo de roda são causadas pelo seu desenho com grandes janelas, o que auxilia a ventilação para resfriamento dos freios e possibilita maior versatilidade de estilo, pois o disco desta roda fica inteiramente escondido sob a cobertura, ao contrário das rodas convencionais.

Além disso, apresentam as mesmas vantagens que as rodas de aço convencionais quanto à diferenciação através da cobertura, o que permite reestilização a baixo custo de ferramental (modifica-se apenas a cobertura) e sem necessidade de revalidação da estrutura.

### 9.3. Aço duplex (*dual phase steel*)

O aço mais comumente empregado na fabricação de discos de roda atualmente no Brasil e na América do Norte é o HSLA (*high-strength low-alloy*), enquanto que na Europa, os aços *dual phase* já vêm sendo utilizados desde o final da década de 80 (ver figura 9.12).

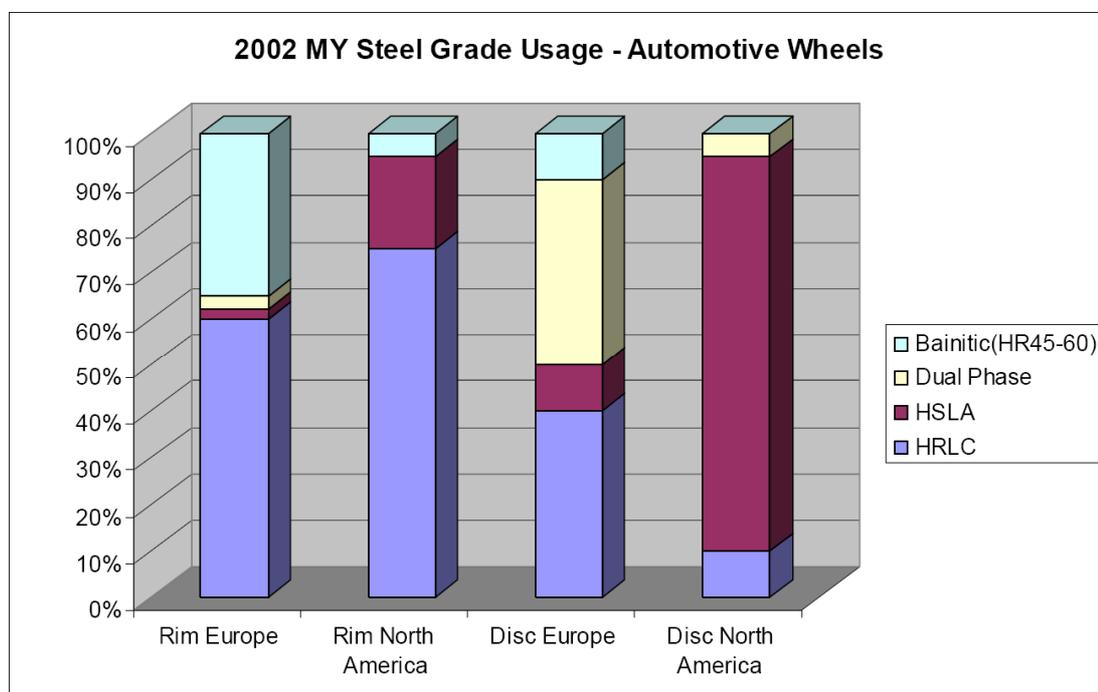


Fig. 9.12 – Aços utilizados em aros e discos de rodas automotivas nos continentes europeu e norte-americano em 2002

Como propriedades fundamentais do material para esta aplicação, deve-se citar a tensão limite de resistência, a razão entre a tensão limite de escoamento e a limite de resistência e a resistência à fadiga.

A tensão limite de resistência e a razão entre limite de escoamento e de resistência devem ser consideradas devido ao processo de estampagem profunda ao qual o material será submetido. Quanto maior o limite de resistência do material, menor será a probabilidade de ruptura da peça na estampagem, pois são possíveis maiores forças no processo antes de atingir-se o limite de resistência, a partir do qual a peça sofre estricção até a ruptura. Já a razão entre limite de escoamento e limite de resistência deve ser a menor possível, para que se tenha uma grande faixa de tensões a serem aplicadas de modo que a estampagem seja bem sucedida, o que ocorrerá caso as tensões sejam mantidas acima do limite de escoamento (para que ocorra deformação permanente) porém abaixo do limite de resistência (para que a peça não se rompa).

A resistência à fadiga deve ser considerada devido à necessidade de resistência estrutural da peça, que deverá suportar cargas e impactos quando em uso. Assim, quanto maior a resistência à fadiga, maior será a vida do produto final. Não se deve considerar aí o limite de escoamento como critério para resistência estrutural devido ao conflito com o processo de fabricação. Afinal, pela necessidade de resistência estrutural seria melhor um alto limite de escoamento, porém para a estampagem seria mais conveniente um material com baixo limite de escoamento, pois seria estampado com a aplicação de menores forças.

Os aços HSLA atualmente utilizados possuem limite de resistência mínimo em torno de 520 MPa (75ksi) e razão entre limites de escoamento e resistência entre 0,80 e 0,90.

Segundo informações do Departamento da Ciência dos Materiais e Metalurgia da Universidade de Cambridge, o aço *dual phase* é caracterizado por constituintes com grandes diferenças de dureza. Sua microestrutura consiste de 85 a 90% de ferrita poligonal, de baixa dureza, com 10 a 15% de martensita, de alta dureza, que forma ilhas regularmente dispersas na matriz de ferrita. Essa microestrutura é obtida após resfriamento na região ferrítica, com formação da ferrita em uma temperatura intermediária, e aplicação posterior de altas taxas de

resfriamento para evitar a formação de bainita, com a temperatura abaixo da temperatura de início de formação de martensita. Uma premissa para se obter martensita é o enriquecimento do carbono na austenita retida durante a formação de ferrita. O carbono juntamente com elementos adicionais tais como cromo, manganês ou molibdênio retarda fortemente a transformação em bainita, porém também abaixa a temperatura de início da martensita.

A composição do aço *dual phase* DP600 está exemplificada na tabela 9.2.

Tab. 9.2 – Composição química do aço *dual phase* DP600 em porcentagem de massa

<b>C</b> max.	<b>Mn</b> max.	<b>Si</b> max.	<b>P</b> max.	<b>S</b> max.	<b>Cr+Mo+B</b> max.	<b>Nb+Ti</b> max.	<b>N</b> max.
0,12	1,4	0,5	0,085	0,008	1,3	0,05	~0,0050

Em 1999, a Hayes Lemmerz International Inc. realizou um estudo investigativo quanto a utilização de aços *dual phase* na manufatura de rodas automotivas. Foram analisados sete fornecedores globais, sendo dois norte-americanos, dois europeus, dois asiáticos e um sul-americano (Usiminas). Os aços *dual phase* desses fornecedores foram avaliados principalmente quanto à resistência à fadiga (figuras 9.13), quanto ao limite de resistência (tabela 9.3) e quanto à razão entre limites de escoamento e de resistência (também tabela 9.3). Todos os resultados foram comparados com as mesmas propriedades do aço HSLA.

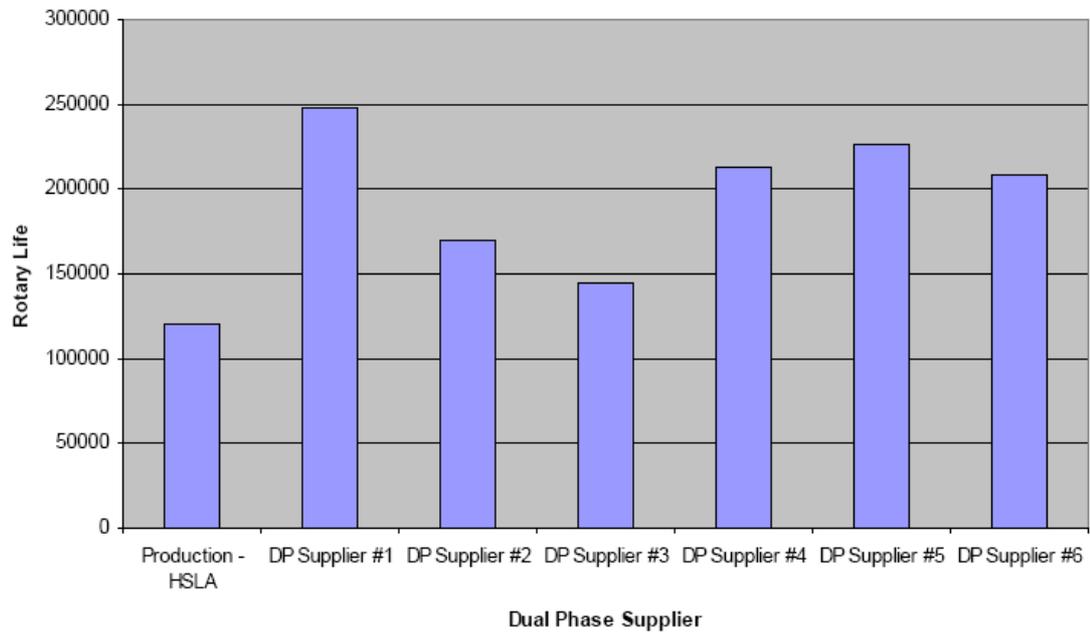


Fig. 9.13 – Gráfico da vida à fadiga em ensaio rotativo dos aços *dual phase* estudados e de um aço HSLA

Tab. 9.3 – Limite de resistência ( $\sigma_t$ ) e razão entre limites de escoamento ( $\sigma_y$ ) e de resistência ( $\sigma_t$ ) dos aços *dual phase* estudados e de aços HSLA típicos

Aço	$\sigma_t$ min.	$\sigma_y / \sigma_t$
HSLA típico	520 MPa (75ksi)	0,80 a 0,90
<i>Dual Phase</i>	600 MPa (87ksi)	0,60 a 0,70

Segundo esse estudo da Hayes Lemmerz International Inc., os benefícios da utilização de aços *dual phase* puderam ser confirmados, visto que houve uma melhoria média na performance à fadiga de 50%, o que permitiria uma redução na massa de aproximadamente 10%.

Ainda segundo esse estudo, foi levantada a preocupação quanto à utilização de aços *dual phase* baseados em silício devido à aparição após a estampagem de defeitos superficiais que comprometeram a aparência. Foi recomendada a utilização de aços *dual phase* baseados em cromo para evitar tal problema.

O estudo realizou ainda uma verificação da aplicação de aços *dual phase* às rodas no estilo Kühl, comparando com o aço HSLA a vida à fadiga (figura 9.14). Nota-se que o aço *dual phase* teve maior resistência à fadiga no ensaio rotativo.

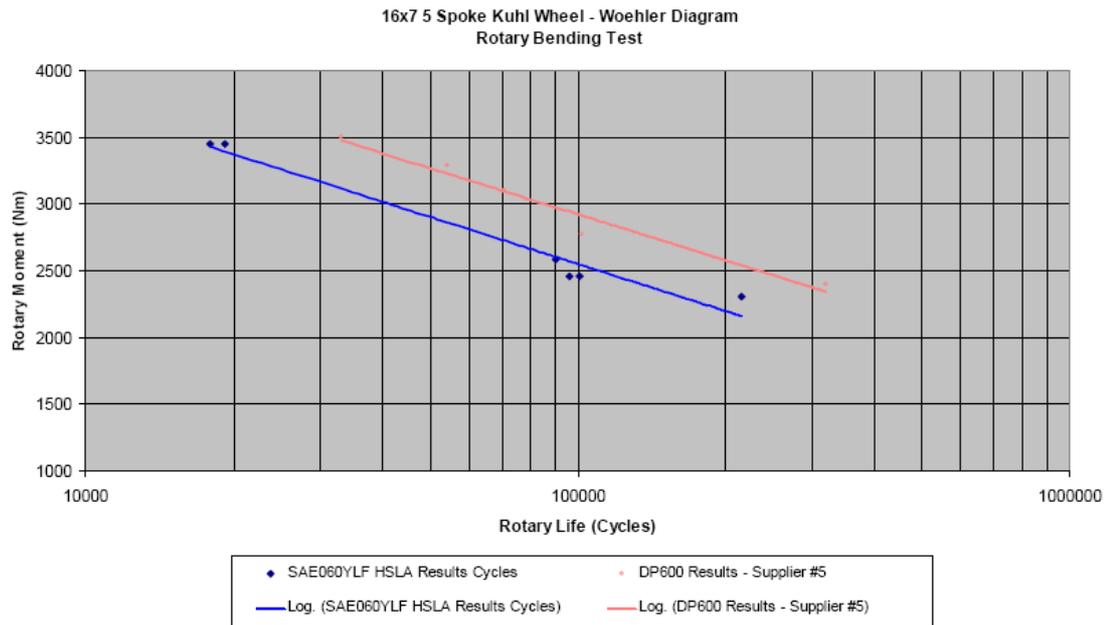


Fig. 9.14 – Diagrama de Wohler da vida à fadiga em ensaio rotativo de rodas Kuhl fabricadas com um aço *dual phase* e um aço HSLA

Os aços *dual phase* possuem também uma boa soldabilidade, não havendo grande detrimento das propriedades na zona termicamente afetada pela solda.

No Brasil, verificou-se a existência de um aço *dual phase* produzido pela Usiminas, o DP590, cujo limite de resistência é 590 MPa , disponível em espessura máxima de 2,30mm e largura máxima de 1500mm. O alongamento e o limite de escoamento devem ser acordados com a Usiminas.

## 10. CONCLUSÕES

Constatou-se que, de fato, as rodas utilizadas pela General Motors do Brasil estão com massa acima das outras rodas disponíveis no mercado. O principal motivo dessa realidade não é a geometria utilizada no disco dessas rodas, mas sim sua espessura. Explicações possíveis para essa diferença de espessura são a utilização de materiais com pior rendimento em termos de massa ou o maior rigor dos critérios de projeto dessas rodas. É recomendável que se faça verificações e testes quanto ao material utilizado nas rodas de outras montadoras acompanhados de uma reavaliação dos critérios de projeto das rodas utilizadas pela GMB.

Encontrou-se nas rodas no estilo Kühl uma alternativa constituída por um produto inovador, com vantagens técnicas e estéticas. Porém, a patente sobre esse produto torna obrigatória a negociação com a empresa proprietária. Ainda assim, é uma alternativa interessante devido à real possibilidade de redução de massa, às grandes janelas para ventilação dos freios, à estética diferenciada e à possibilidade de extensão do processo de substituição também às rodas de alumínio, através das coberturas que mimetizam o acabamento deste material.

O aço duplex (*dual phase*) mostrou-se um material mais eficiente para esta aplicação do que o HSLA (*high-strength low-alloy*) atualmente utilizado. Suas propriedades são propícias para os requisitos de projeto, provendo maior resistência estrutural (através da maior resistência à fadiga) e melhor estampabilidade (devido ao limite de resistência maior e à menor razão entre limites de escoamento e de resistência). É necessária uma avaliação quanto à disponibilidade desse material no mercado brasileiro.

Todas essas alternativas de solução necessitam ainda de um estudo e avaliação econômica mais aprofundados, possíveis apenas após negociação com os prováveis fornecedores das rodas como produto final e do material para manufatura das mesmas.

## 11. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

*American Iron and Steel Institute* (AISI), Instituto Americano do Ferro e Aço – [www.autosteel.org](http://www.autosteel.org)

Anuário da Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA) – disponível em [www.anfavea.com.br](http://www.anfavea.com.br)

Centro de Informação Metal Mecânica (CIMM) – [www.cimm.com.br](http://www.cimm.com.br)

*Department of Materials Science and Metallurgy of University of Cambridge*, Departamento da Ciência dos Materiais e Metalurgia da Universidade de Cambridge – [www.msm.cam.ac.uk](http://www.msm.cam.ac.uk)

Enciclopédia do automóvel, volume 8. Editora Abril S.A. Cultural e Industrial. São Paulo, 1974. Páginas 1721 a 1724.

FITZ, F., HECK, T. Development of tooling for a light weight steel Kühl wheel. SAE World Congress. Michigan, 2001.

Handbook of automotive engineering; edição Braess, H. H., Sieffert, U.; SAE International, 2005.

Hayes Lemmerz International Inc, empresa líder mundial na produção de rodas automotivas (dado de 2006) – [www.hayes-lemmerz.com](http://www.hayes-lemmerz.com)

KAMINSKI, Paulo. Desenvolvendo produtos com planejamento, criatividade e qualidade. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. Rio de Janeiro, 2000. Páginas 27 a 35.

Manual de tecnologia automotiva, Bosch,R.; tradução Madjderey, H., Prokesch, G. W., Zerbini, E. J., Pfeferman, S.; São Paulo: Edgard Blücher, 2005.

Normas 2005/2006 da Associação Latino-Americana de Pneus e Aros (ALAPA) – [www.alapa.com.br](http://www.alapa.com.br)

*United States Patent and Trademark Office* (USPTO), órgão oficial do governo dos Estados Unidos regulador de marcas e patentes – [www.uspto.gov](http://www.uspto.gov)

Usiminas, empresa brasileira da área de siderurgia – [www.usiminas.com.br](http://www.usiminas.com.br)

*World Intellectual Property Organization* (WIPO), Organização Mundial da Propriedade Intelectual – [www.wipo.int](http://www.wipo.int)