GLEITON LUIZ DAMOULIS

**ANÁLISE DO PROCESSO DE CONFORMAÇÃO DE CHAPAS UTILIZANDO
SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E ENGENHARIA REVERSA COMO
FERRAMENTAS INTEGRADAS NO DESENVOLVIMENTO E CONSTRUÇÃO DE
ESTAMPAS AUTOMOTIVOS**

(Versão com figuras removidas devido a acordo de sigilosidade)

**SÃO PAULO
2010**

GLEITON LUIZ DAMOULIS

**ANÁLISE DO PROCESSO DE CONFORMAÇÃO DE CHAPAS UTILIZANDO
SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E ENGENHARIA REVERSA COMO
FERRAMENTAS INTEGRADAS NO DESENVOLVIMENTO E CONSTRUÇÃO DE
ESTAMPAS AUTOMOTIVOS**

**Tese apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do
Título de Doutor em Engenharia.**

Área de concentração:

**Engenharia Mecânica
de Projeto e Fabricação**

Orientador:

Prof. Dr. Gilmar Ferreira Batalha

**SÃO PAULO
2010**

(Versão com figuras removidas devido a acordo de sigilosidade)

FICHA CATALOGRÁFICA

Damoulis, Gleiton Luiz

Análise do processo de conformação de chapas utilizando simulação computacional e engenharia reversa como ferramentas integradas no desenvolvimento e construção de estampos automotivos / Gleiton Luiz Damoulis -- São Paulo, 2010.

181 p.

Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica

1. Simulação 2. Processos de fabricação (Engenharia Mecânica 3. Método dos elementos finitos I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Gilmar Ferreira Batalha pelo incentivo, orientação e paciência.

À minha esposa Ana Paula e a meus filhos pelo apoio e compreensão.

A todos que diretamente ou indiretamente colaboraram na execução deste trabalho.

RESUMO

ANÁLISE DO PROCESSO DE CONFORMAÇÃO DE CHAPA UTILIZANDO SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E ENGENHARIA REVERSA COMO FERRAMENTAS INTEGRADAS NO DESENVOLVIMENTO E CONSTRUÇÃO DE ESTAMPOS AUTOMOTIVOS

Em anos recentes, os processos de conformação de chapas automotivas têm sido drasticamente modificados. A utilização de equipamentos de medição metrológicos óticos sem contato e respectivos softwares baseados em fotogrametria, bem como o uso de programas de simulação de estampagem baseados no Método dos Elementos Finitos (FEM), estão se tornando uma rotina no desenvolvimento de ferramentais de estampagem, visto que a confiabilidade, precisão de resultados e facilidade de uso em relação à topologia superficial do ferramental, representou um grande salto tecnológico. Entretanto, por maior que tenha sido o avanço, persistem ainda problemas relacionados ao custo benefício quanto à adoção de certas técnicas e a possibilidade de utilizar ambos os sistemas de forma a um complementar o outro. Neste sentido, o objetivo desta tese é analisar o processo de conformação de chapas utilizando simulação computacional e engenharia reversa como ferramentas integradas no desenvolvimento e construção de estampos automotivos. São descritos casos industriais, cujos resultados demonstram que novas técnicas podem ser aplicadas na definição e modelagem do processo de estampagem de chapas metálicas, utilizando a metrologia ótica, engenharia reversa e a simulação computacional baseada no Método dos Elementos Finitos.

Palavras-chave: conformação de chapas metálicas, simulação, fotogrametria, engenharia reversa, simulação computacional, elementos finitos.

ABSTRACT

SHEET METAL FORMING PROCESS ANALYSIS USING COMPUTER SIMULATION AND REVERSE ENGINEERING AS INTEGRATED TOOLS IN AUTOMOTIVE STAMPING DESIGN AND CONSTRUCTION

In recently years, sheet metal forming processes used in automotive industry have been drastically modified. The use of non-contact measurement devices based on optical metrology and respective software based on photogrammetry, and the use of stamping simulation programs based on Finite Element Method (FEM), are becoming a routine in the development of tools for stamping, visa that reliability, accuracy of results and ease of use, in relation to the tooling surface topology, was a major technology leap. However, although this advancement, there are still remaining problems related to the cost benefit of the adoption of certain techniques, and the possibility of the use of both systems, in order to complement one another. In this sense, the aims of this thesis is to analyze the sheet metal forming process using computer simulation and reverse engineering as integrated tools in design and construction of automotive dies. Industry cases are described, whose results show that new techniques can be applied in definition and modeling of stamping metal sheets process, using optical metrology, reverse engineering and computer simulation based on Finite Element Method.

Keywords: sheet metal forming, simulation, photogrammetry, reverse engineering, computer simulation, finite element.

SUMÁRIO

1	Introdução	1
2	Conceito Cadeia CAD-CAE no Desenvolvimento de Meios de Manufatura.	5
2.1	A Aplicação de CAD na Fase de Concepção do Veículo	5
2.2	Simulação dos Processos de Estampagem	6
2.3	Tecnologias de Apoio Computacional na Conformação de Chapas.	7
2.3.1	Cadeia CAD/CAM para a fabricação de ferramentas protótipo	7
2.3.2	Cadeia CAD/CAM na construção da ferramenta e modelos	9
2.4	Uso do CAD nos Meios de Fabricação.	10
2.5	Simulação da Conformação de Chapas como Ferramenta Integrada no Processo de Desenvolvimento de Carrocerias Automotivas	10
2.5.1	Utilização das simulações no processo de desenvolvimento da carroceria	10
2.5.2	Aplicação das simulações de conformação de chapas	12
3.	Análise Experimental Comparativa entre Métodos Teóricos e Práticos	15
3.1	Introdução ao Método Proposto e Objetivo	15
4	Modelagem do processo real de conformação em um modelo de simulação	19
4.1	Conceito ‘Simulação da Estampagem de Chapas’	19
5	Modelagem Matemática: Criando um modelo virtual e Definição dos Critérios Analíticos ao Método de Estampagem em Relação ao Processo Real	23
5.1	Digitalização da Ferramenta – Determinação Fotogramétrica das Coordenadas de Posição do Modelo	23
5.1.1	Modelo de Câmera	23
5.1.2	Sistema de ajuste de feixes	25
5.1.3	Marcadores Circulares	26
5.1.4	Análise do Formato de Dados “STL” e Variações da Geometria	30
5.2	Formatos de Arquivos Eletrônicos	34
5.2.1	Formatos Disponíveis	34
5.2.2	Análise dos dados de saída	37
5.2.3	Modelagem dos “ <i>Drawbeads</i> ” ou Planos Geométricos de Retenção ao Escoamento	42
6	Comparativo com a Prática: Construção de um modelo virtual em confronto com os Resultados Práticos	50
6.1	Calibração da Simulação	50
6.2	Avaliação e Comparação entre Valores	52
6.3	Análise dos Parâmetros de Simulação	58
6.3.1	Parâmetros Tecnológicos	58
6.3.2	Parâmetros da Simulação	59
6.4	Critérios de Rezoneamento	62
6.4.1	Critério de Fissão dos Elementos	62
6.4.2	Critério de Contato Peça-Ferramenta	63
6.4.3	Critério de Fusão dos Elementos	64

7	Criação de um Procedimento Metodológico para Comparação Entre Prática e Teoria - Exemplo de aplicação metodológica em um caso industrial	66
7.1	Conceito	66
7.2	Fluxo de Trabalho e Nomenclatura de Modelos	68
7.3	Comparação da teoria com a prática utilizando como exemplo o modelo “Ferramenta de Engenharia Reversa FER1”	73
7.3.1	Fase 1: Preparação e Análise dos dados “Simulação e Modelo FER1”	73
7.3.2	Calibração e Análise do Modelo FER1	83
7.3.3	Análise do modelo dimensional FER2	91
7.3.4	Propostas Técnicas de Tryout ao Modelo FER1	100
7.4	Modelo FER3	105
7.4.1	Calibração e análise do modelo FER3	106
7.5	Análise do modelo dimensional FER4	109
7.6	Análise geral dos dados e comparação entre modelos FER’n’	111
7.7	Continuação do Tryout – Análise da necessidade de outros Modelos FER’n’	113
8	Conclusões	114
	Bibliografia	
	Apêndice A	
	Apêndice B	
	Apêndice C	

LISTA DE FIGURAS

Fig.1.1	Objetivos do sistema inteligente de conformação de chapas	4
Fig. 2.1	Representação esquemática do desenvolvimento de veículos	5
Fig. 2.2	Processo CAD/CAM para desenvolvimento de ferramentas de conformação de chapas	8
Fig 2.3	Usos da simulação no processo de desenvolvimento de carrocerias automotivas	12
Fig. 3.1	Posicionamento dos resultados na cadeia de processo	17
Fig. 4.1	Representação esquemática do conceito de modelagem	19
Fig. 4.2	Controle da entrada de dados (parâmetros) para as simulações de estampagem (Conceito)	21
Fig. 4.3	Interface processo-modelo matemático	22
Fig. 5.1	Determinação das coordenadas do ponto objeto P_i através do método de feixes de triangulação de diferentes planos de imagem B_i .	24
Fig. 5.2	Projeção Central	26
Fig. 5.3	Peça conformada preparada para a medição	27
Fig. 5.4	Composição e operação do scanner fotogramétrico ATOS®	28
Fig. 5.5	Superfície do ferramental. Se evidencia a coloração esbranquiçada resultante da aplicação do meio contrastivo, bem como na região clara ao fundo se verificam as franjas projetadas	29
Fig. 5.6	Análise do Formato de Dados “STL” e Variações da Geometria	29
Fig. 5.7	Representação esquemática do off-set ou erro de deslocamento	32

Fig. 5.8:	Representação esquemática do critério angular com superfície recriada a partir do software POLIWORKS®	33
Fig. 5.9 (a)/(b)	Representação da superfície de partida (a), com 448000 elementos, e a versão modificada com o software POLIWORKS® (b), com 88000 elementos	34
Fig. 5.10 (a)/(b)	Corpo representado com a geometria no formato VDA (a); com a geometria representada no formato STL (b).	36
Fig. 5.11	Função princípio de conversão da nuvem de pontos em superfície geométrica	37
Fig. 5.12	Comparação geométrica dos dados de partida em relação aos dados da digitalização em VDA, com base no critério “janela de comparação”	39
Fig. 5.13	Representação gráfica do tempo de pré-processamento e processamento computacional (CPU)	41
Fig. 5.14	Exemplo de aplicação típica de inserção geométrica (a) e o clássico modelo de “drawbead” (b), ambos inseridos de forma a controlar o escoamento da chapa ao interno do estampo	44
Fig. 5.15	Representação dos modelos (a) inserção geométrica e (b) “drawbead” inserido na superfície	44
Fig. 5.16:	Representação do fenômeno de retorno elástico provocado pela deformação local dos “drawbeads”	48
Fig. 5.17 (a) (b):	Representação gráfica do resultado comparativo entre o escoamento da platina (em relação ao seu perímetro inicial) onde, no modelo (a) verifica-se como geometria uma inserção geométrica local e, no modelo (b), observa-se a presença de “drawbeads”	49
Fig. 6.1:	Representação do escoamento da platina como um valor de calibração a simulação	50
Fig. 6.2:	Representação de pontos na superfície da peça	53
Fig. 6.3:	Resultado Simulação com INDEED® para a componente obtido no estágio de calibração	55
Fig. 6.4:	Resultado Simulação com AUTOFORM® para a componente obtido no estágio de calibração	55
Fig. 6.5	Resultado Simulação com INDEED® para a componente obtido no estágio de calibração	56
Fig. 6.6	Resultado Simulação com AUTOFORM® para a componente obtido no estágio de calibração.	56
Fig. 6.7	Influência nos resultados da simulação através da gestão dos parâmetros	54
Fig. 6.8	Divisão do Elemento	62
Fig. 6.9	Ação do critério de fissão, (a) critério de partida, (b) definição de novos elementos	63
Fig. 6.10	Critério de penetração na ferramenta. (a) Limite do critério, se observa a interferência entre platina e a superfície da matriz, (b) definição de novos elementos	64
Fig. 6.11:	Critério de fusão dos elementos (a) o ângulo entre as normais é tal que a soma do comprimento dos dois elementos não excede 20[mm], portanto ambos podem fundir-se (b) formando um elemento único	65
Fig. 7.1	Guia de fases para a definição de “processo standard” em confronto com a prática	66
Fig. 7.2	Diagrama de fluxo de atividades “Engenharia Reversa”	69

Fig. 7.3	Representação em CAD (Modelo CAD1) da lateral esquerda do modelo 955	74
Fig. 7.4	Representação do modelo do ferramental de estampagem de um lateral	75
Fig. 7.5	Representação do modelo (MOD1) da simulação de repuxos. Em evidência a zona de repuxo crítica, zona da caixa de roda posterior	77
Fig. 7.6	Representação do modelo de análise de conformação dos raios para FER1. Representados em cores laranja e azul os raios de definição estilística do componente	78
Fig. 7.7	Detalhe da análise de conformabilidade dos raios da lateral (detalhe FER1)	79
(a) (b):		
Fig. 7.8	Representação das zonas críticas da lateral do modelo FER1	79
Fig. 7.9	Representação da operação OP20 de repuxo da lateral, onde se evidenciam a distribuição e posicionamento dos drawbeads	81
Fig. 7.10	Blank repuxado da operação OP20	82
Fig. 7.11	Representação dos dados da simulação do modelo FER1 em sequência de fechamento do estampo	88
a,b,c,d		
Fig. 7.12	Representação da posição 17 [mm] do ponto de fechamento do estampo para o modelo FER1	89
Fig. 7.13	Representação dos estágios de conformação 10 [mm] do fechamento e estampo completamente fechado (estado final) do modelo FER1	90
Fig. 7.14	Representação física das laterais externas posicionadas no “Meisterbock”	92
Fig. 7.15	Análise de uma lateral de primeiro tryout no <i>Meisterbock</i> em relação à porta ...	94
Fig. 7.16	Valores geométricos dimensionados no <i>Meisterbock</i> representando o modelo FER2 (medidos utilizando-se máquina de medição por coordenadas)	95
Fig. 8-1	Cronograma de acompanhamento e implementação de atividades de tryout de um estampo de uma lateral automotiva: na parte alta cronograma identificamos as 32 semanas do período de atividades	149
Fig. A-1:	Curva de tensão de escoamento real em função da deformação verdadeira para o material experimental em comparação aos dados teóricos deste	
Fig. A-2:	Diagrama Limite de Conformação para o material DX56D experimental em comparação aos dados teóricos deste.	
Fig. A-3:	Curva de tensão de escoamento real em função da deformação verdadeira para o material H340X experimental em comparação aos dados teóricos deste.	
Fig. A-4:	Diagrama Limite de Conformação para o material H340X experimental em comparação aos dados teóricos deste.	
Fig. B.1	Representação esquemática em CAD de um Meisterobock Carroceria	
Fig. B.2	Meisterobock físico da Carroceria montado com componentes da carroceria (laterais completas).	
Fig. B.3	Estrutura do Meisterobock físico da Carroceria.	
Fig. B.4	Representação em CAD da estrutura do Meisterobock físico de uma Carroceria	

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Quantidade de elementos da superfície da matriz com superfície recriada a partir de critérios geométricos disponíveis no software POLIWORKS®	66
Tabela 2	Comparativo entre valores de cálculo e quantidade de elementos de superfície geométricos	72
Tabela 3	Comparativo entre valores de resultado da simulação com o formato de saída de dados	75
Tabela 4	Resultado comparativo entre o escoamento da platina e da redução de espessuras	80
Tabela 5	Exemplo de avaliação, cálculo e análise de erro relativo [%]	89
Tabela 6	Representação REP dos valores de AUTOFORM® e INDEED® para a travessa do teto com o material	90
Tabela 7	Resultado comparativo entre o escoamento da platina (em relação ao seu perímetro inicial) entre a peça real (operação 20) e a simulação (com inserção local de “drawbeads” tipo “meia-cana”) para o modelo FER1	117
Tabela 8 (a) e (b):	Análise da distribuição de espessuras (em valores percentuais) na peça real do 1.tryout da lateral modelo 955 comparados ao modelo de condição inicial denominado MOD1 e a simulação realizada para o modelo FER1	118
Tabela 9 (a)(b)(c):	Representações dos desvios geométricos referidos aos modelos MOD1 (modelo de análise da condição do método proposto, dimensão lado esquerdo com referência matemática), FER1 (modelo simulado da superfície digitalizada do ferramental) e do modelo FER2 (descrição geométrica dimensional da lateral física, dimensionada a Meisterbock utilizando-se uma Máquina Medição por Coordenadas [MMC]).	130
Tabela 10	Resultado comparativo entre o escoamento da platina (em relação ao seu perímetro inicial) entre a peça real (operação 20) antes e depois do primeiro tryout e as simulações (com inserção local de “drawbeads” tipo “meia-cana”) para os modelos FER1 e FER3	140
Tabela 11	Análise da distribuição de espessuras (em valores percentuais) na peça real do 1.tryout da lateral modelo 955 com os resultados da simulação do modelo FER3, comparados ao modelo de condição inicial denominado MOD1 e a simulação realizada pra o modelo FER1	142
Tabela 12 a,b,c,d,e	Representação dos desvios geométricos referentes aos modelos MOD1, FER1, FER2, FER3 e FER4	144
Tabela 13:	Panorama geral da redução de custos a atividade de engenharia reversa. Valores em Euros [€]	150
Tabela A14:	Aços típicos utilizados na indústria automobilística mundial (standard de mercado), segundo a norma DIN EN 10142	
Tabela A15:	Valores comparativos experimentais x standard para o material DX56D	
Tabela A16	Valores comparativos experimentais x standard para o material H340X	

LISTA DE ABREVIATÖES

CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
MEF	Método dos elementos finitos
DMU	Digital Mock-up
ABS	Valor Absoluto
REP	Redução de Espessura
CLC	Forming Limit Diagram (Diagrama Limite de conformação)
CNC	Comando Numérico Computadorizado

1 Introdução

Por mais de cem anos, no desenvolvimento tecnológico de automóveis tudo já foi pensado, desenhado, construído e rejeitado ao menos uma vez. Hoje, grandes novidades tecnológicas que podem afetar a cadeia automotiva são anunciadas apenas somente esporadicamente. Na cadeia automobilística, pontos importantes na questão da produtividade e fabricação [1] são as estampagens progressivas de grandes peças com geometrias complexas, empregadas na construção de carrocerias. São ainda esses mesmos componentes de geometrias complexas que representam a máxima dificuldade técnica em toda a linha de desenvolvimento da manufatura, principalmente em termos de custos e tempo de fabricação. Para a conformação a frio de chapas metálicas, deve ser definido para cada peça o plano de fabricação e método necessário, de acordo com sua geometria, topologia e material.

A utilização do *CAD* (*Computer Aided Design*) aplicado ao processo de modelagem e desenvolvimento do produto tem sido de grande valia para o construtor, pois é uma potente ferramenta que facilita e minimiza o tempo de trabalho, além de reduzir custos. Não somente na construção de detalhes, como também uma carroceria inteira pode ser representada desde um primeiro estágio em modelagem protótipo na tela do computador, podendo ser modificada até a sua forma definitiva. Com a utilização do modelo *CAD*, que traça a geometria do futuro automóvel, dá-se início à construção do protótipo. Antes de toda a atenção ser destinada a esse protótipo, em primeiro lugar é colocada em prática a análise computacional, traduzindo-se o modelo *CAD* para um modelo *CAE* (*Computer Aided Engineer*), que permite obter protótipos virtuais dos produtos, simulando sobre eles as condições de uso. O processo principal do *CAE* é o Método de Análise por Elementos Finitos (*MEF*). Nos anos 60, foram instalados os primeiros programas comerciais utilizando-se esse método de cálculo. Já naquela época possuíam um potencial de utilização extraordinário. Hoje em dia, não é mais possível pensar em não usar mais o método dos elementos finitos (*MEF*), pois ele ajuda a reduzir o tempo gasto no desenvolvimento de primeira linha em componentes com altas complexidades geométricas, em relação à tradicional sistemática utilizada no passado de “tentativa e erro”, até a obtenção dos resultados práticos desejados.

Infelizmente, ainda hoje esse processo de “tentativa e erro” não foi totalmente descartado, devido a algumas limitações técnicas de processo e desenvolvimento de produto, aliada à falta de capacitação técnica, o que desperdiça tempo e aumenta os custos (estes últimos por muitas vezes superados em um fator 2 ou 3). Além disso, há ainda o risco de perda na qualidade final do produto. Em termos gerais, esse é um grande problema que ainda não foi completamente resolvido e que representa um gargalo em toda a cadeia de implementação de manufatura de um programa de lançamento de um veículo. Um exemplo de como essa questão pode pesar em um projeto, está expresso na recente declaração de Harald Wester, CEO da Maserati e Vice Presidente de Engenharia & Desenvolvimento do Grupo FIAT [2]:

[...] Com os atuais métodos de desenvolvimento de produto, a FIAT pode já hoje desenvolver (em nível de produto) um veículo completo em apenas 18 meses, sendo que a cada ano que passa, podemos ainda tecnicamente reduzir esse tempo de 1 mês. O problema então será a manufatura, que se tornara um gargalo em todo este processo, que não será capaz de disponibilizar os meios para produzir os veículos com a mesma velocidade [...]

Refletindo-se então sobre isto, essas palavras encontram um sentido justo se passarmos a analisar criticamente a cadeia de interface produto-processo de um determinado veículo, onde então veremos que realmente a fase crítica é aquela onde se iniciam os *tryouts* dos meios de estampagem, tecnicamente o “gargalo” produtivo de manufatura.

Obterem-se peças estampadas no início do tryout das linhas de produção de carrocerias automotivas com certo nível qualitativo é também um elemento estratégico para o bom ajuste e pela partida produtiva (ou colocação em funcionamento) destas linhas. Se tais elementos estampados, não são corretos geometricamente ou se estes possuem não conformidades geométricas dimensionais, então os técnicos e engenheiros de manufatura terão muitos problemas para obter a estabilidade (capacidade (C_p) e capacidade (C_{pk})) na geometria do produto/processo carroceria, podendo haver, como consequência, o atraso na liberação de produção desta linha devido à falta de qualidade do produto, com repercussão desastrosa em termos de custos e atraso na entrega ao cliente final.

Hoje, com base no “know-how” acumulado em diversos projetos automobilísticos e análise de diversos casos de mercado de certas OEM’s (com diferentes culturas de manufatura), pode-se afirmar que o ponto crítico de todo esse sistema é a construção e a colocação em funcionamento de todos os estampos que devem gerar componentes de geometria complexas (tryout), com as diversas fases de intervenção e ajustes, o que consome tempo e dinheiro, além da possibilidade de não se chegar à qualidade esperada do produto final, com consequências desastrosas em termos de retrabalho (custo da não qualidade). Além disso, muitas vezes a imagem do produto ou do fabricante pode ser exposta negativamente [3-4].

Com o advento de novos materiais e técnicas de fabricação, além dos novos conceitos construtivos, é possível hoje integrar as diversas peças estampadas em uma única peça, reduzindo os custos nos mecanismos de estampagem, no ferramental e na logística, bem como os investimentos na montagem de carrocerias (menor sobreposição de componentes e redução em uniões (soldadas)). As simulações computacionais são fundamentais, uma vez que demonstram ou não a viabilidade dos projetos, possibilitando testes sem que haja gasto real na construção do ferramental. A metrologia industrial também se faz fundamental nesta fase de tryout, mas não somente no sentido de apenas “medir” uma peça ou determinado componente, mas como suporte ao desenvolvimento de métodos de engenharia reversa, posicionamento do componente no espaço e análise dimensional deste (principalmente quanto ao seu retorno elástico), o que permite ter uma ideia do estado de maturidade dimensional, ou seja, da capacidade e capacidade deste quanto ao seu uso na cadeia de manufatura. Também não pode ser esquecido que o método dos elementos finitos atualmente é um requisito necessário para a simulação de ferramentas e processos de conformação de componentes para a indústria automobilística. Entretanto, a utilização das ferramentas CAE ainda está restrita, em grande parte, a especialista no método dos elementos finitos [4].

O objetivo desta tese é propor uma metodologia analítica que contemple a expertise técnica da “prática” em detrimento à análise “teórica”, possibilitando a intervenção primária na cadeia de desenvolvimento de processo e produto do tryout dos estampos, diminuindo, assim, o desperdício gerado pela prática da “tentativa e erro”.

Como consequência da proposição desta metodologia analítica, será possível à criação de um sistema inteligente que agregará um banco de dados e informações aos engenheiros que possa, futuramente, ser integrado aos softwares de desenvolvimento, sejam estes de natureza CAE ou CAD, o que facilitará o processo de desenvolvimento do componente na ótica de manufaturabilidade (DFM-Design for Manufacturing). Não somente com intuito, mas como ideia prática, esperamos que, no futuro, os engenheiros construtores possam ter, em suas ferramentas CAD, sistemas capazes de analisar os processos de conformação e que estes possam ser simulados com o auxílio de comandos de cálculos e método dos elementos finitos integrados ao CAD. Os objetivos deste sistema inteligente estão representados na figura 1-1.

Fig.1-1: Objetivos do sistema inteligente de conformação de chapas

2 Conceito Cadeia CAD-CAE no Desenvolvimento de Meios de Manufatura

2.1 A Aplicação de CAD na Fase de Concepção do Veículo

Uma representação esquemática esclarece a interação no desenvolvimento do veículo (Figura 2.1). A integração do CAD começa na fase de concepção do produto, passando ao estabelecimento dos objetivos de marketing (conceito do veículo e “*Benchmark*”) e no planejamento dos meios de fabricação e de sua própria construção [5] [6]. Os primeiros conceitos dimensionais gerais para projeto de uma carroceria (forma e design) devem ser trabalhados e definidos juntamente com estilistas.

Fig. 2.1: Representação esquemática do desenvolvimento de veículos

Com a crescente melhoria dos sistemas CAD, hoje em dia já é possível, na fase de concepção, no lugar do modelo em escala, produzir e julgar layouts no CAD (conhecidos como DMU ou *Digital Mock'up*), utilizando-se técnicas de representação em realidade virtual. A representação de um modelo em 3D com semelhança fotográfica em relação ao produto e desenhada com sombreado e luzes facilita a escolha das propostas de designs (forma) do produto [5]. Os projetistas podem examinar os seus esboços através do controle de reflexo de luz incidente sobre a superfície do modelo. No caso do desenvolvimento de forma por CAD através do design, é possível ter, com antecedência, uma superfície para as posteriores operações no campo de construção e produção, o que permite aperfeiçoamentos até o início da produção por engenharia simultânea.

2.2 Simulação dos Processos de Estampagem

No projeto de peças estampadas são realizados certos cálculos sobre a formação e desenvolvimento da forma da peça estampada com base na complexidade do processo de fabricação. Um fator decisivo é, ainda hoje, a experiência adquirida pelos planejadores de métodos ou construtores de ferramentas.

Em relação à pergunta: “*esta peça neste processo de estampagem será conformada sem erros ou não?*” devemos ter uma resposta positiva, visto que muito dinheiro e tempo foram gastos na fabricação das ferramentas. Para uma simulação do processo por computador, a partir da utilização de qualquer um dos diversos programas comerciais disponíveis para a simulação de estampagem (como por exemplo, AUTOFORM, INDEED, PAM-STAMP, UFO-3D, ICEM-STAMP, etc.), foi utilizado como base o método dos elementos finitos (MEF).

Para cerca de 80% das peças que relativamente compõem o escopo de componentes de uma carroceria construída nos padrões materiais e técnicos atuais, e que, provavelmente, irão ter seus respectivos processos e ferramentais desenvolvidos e construídos sem problemas, também é vantajoso pensar em simples simulações dos processos, porém é esperado também um retorno econômico consideravelmente baixo. Apesar do cálculo com elementos finitos ser empregado há

muito tempo com sucesso em conformações, o domínio de simulações de processos de estampagem profunda necessita ainda de uma série de novas descobertas, o que pressupõe um trabalho teórico aprofundado. Isto é especialmente importante, na formulação de **novos** materiais para que os mesmos tenham um bom desempenho e estejam fisicamente livres dos muitos casos de influência da anisotropia e do encruamento, além das altas taxas de conformação. Para a melhoria do layout da fabricação de peças estampadas de alta complexidade geométrica, é indispensável uma primeira discretização pelo MEF para obtenção de resultados com a qualidade esperada. Atualmente, estes programas têm a vantagem de trabalhar tanto com computadores PCs em ambientes MS Windows ou, em se tratando do uso de programas especiais ou cálculos complexos como, por exemplo, o cálculo do retorno elástico de um componente, poderá ser processado a partir de um Sistema-Integrado CAD-CAE.

A Engenharia de Manufatura pode então utilizar o artifício da discretização da superfície do componente a ser estampado, inclusive para tirar as primeiras conclusões sobre a produtividade e sobre possíveis problemas no processo de conformação deste, de forma a interagir no projeto, seja do ferramental, seja na solicitação de mudanças na forma (geometria) do componente, o que ocorre na Engenharia de Desenvolvimento do Produto.

2.3 Tecnologias de Apoio Computacional na Conformação de Chapas

2.3.1 Cadeia CAD/CAM para a fabricação de ferramentas protótipo

O próximo passo, depois da construção do projeto em CAD, é a fabricação de peças protótipo. Esta fase é muito importante porque permite uma pré-análise do plano de métodos de estamparia. As peças protótipo são importantes porque podem dizer muito sobre o processo definitivo e servem de certa forma, para a calibração das simulações de estampagem. A ferramenta protótipo será fabricada a partir do trabalho com os dados matemáticos de CAD e CNC (comando numérico), em material de baixo ponto de fusão, conhecido também como “*Soft-Tool*”(ou ferramental protótipo). A ferramenta de construção para o punção e prensa-chapa dessa ferramenta protótipo será definida por dimensões de CAD, através de métodos e geometria de conformação que, mais tarde, serão úteis para a construção da ferramenta em série (ferramental definitivo) [5]. Uma função dessa ferramenta protótipo é encontrar dimensões seguras,

considerando o efeito elástico e a distribuição de tensões, assim como aprovar a escolha da chapa e a exigente qualidade superficial para a série. O resultado deste teste deve ser trabalhado nas definições da ferramenta da série, para que se possam prever, no corpo de provas (peça protótipo), deformações na peça, de modo que esta possa ser aceita. A Figura 2.2 apresenta a Cadeia CAD/CAM para a fabricação de ferramentas.

Fig. 2.2: Processo CAD/CAM para desenvolvimento de ferramentas de conformação de chapas

2.3.2 Cadeia CAD/CAM na construção da ferramenta e modelos

A partir da prototipagem do ferramental, o fluxo de dados processados em CAD será aplicado na construção dos estampos de série da seguinte forma: as definições de geometria da peça a ser construída da carroceria servirão como dados de entrada na construção da ferramenta [6]. Aqui será também realizado o acabamento das superfícies complementares, assim como os respectivos corpos da ferramenta. Após a construção, esses dados vão para programação CNC (CAM), para produzir o programa de usinagem para fresadoras com três ou cinco eixos, dependendo das formas superficiais livres do componente e da fabricação do ferramental. A padronização dos elementos da ferramenta para o corpo fundido (base do ferramental), assim como o uso de CAD e também de CAM, têm como objetivo a redução do tempo de trabalho na construção do ferramental. Isso ocorre simultaneamente a uma redução do tempo percorrido na construção da ferramenta e do modelo (estudos de otimização dos caminhos de usinagem da fresa em relação à superfície a ser usinada).

A ferramentaria tem atualmente a tarefa, partindo dos dados matemáticos da superfície da carroceria, de gerar programas CNC para a fabricação da superfície do ferramental, desde o desbaste bruto, até o acabamento do mesmo, sua montagem e tryout. Considerando-se as diversas condições de contorno com relação aos custos de fabricação deste ferramental e a qualidade do componente a ser produzido por este, as operações (processo de estampagem) são verificadas e otimizadas, assim como as condições de produção da peça em seu respectivo ferramental. É fundamental que os métodos de planejamento tenham o apoio numérico, de forma que a geometria e as condições de contorno do ferramental possam ser aperfeiçoadas em programas de simulação numérico, baseados no método dos elementos finitos (MEF). Assim, engenheiros e projetistas de métodos poderão contar com uma poderosa ferramenta, a fim de evitar custos desnecessários, uma vez que processos complexos não serão mais planejados ou desenvolvidos por “tentativa e erro”, passando assim, a contar com uma base científica e sólida para seu desenvolvimento [4-6].

2.4 Uso do CAD nos Meios de Fabricação

Paralelamente ao desenvolvimento de componentes da carroceria em CAD 3D, são utilizados também, no campo da fabricação de ferramentas de grande porte (produção de peças de geometria complexas), sistemas para o desenvolvimento de meios de fabricação como, por exemplo, ferramentas de estampagem, dispositivos, calibradores e dispositivos de soldagem, todos desenvolvidos a partir do CAD. Com o suporte deste sistema, a qualidade alcançada no processo será muito maior, o que, devido à sua complexidade, não acontecia quando utilizadas as antigas mesas de desenho. O emprego de CAD representa um ganho de tempo, custo e qualidade, que antes eram desperdiçados pelo longo tempo de testes com processos e meios de produção [7].

A partir das definições a respeito do ferramental a ser construído para a produção de peças para a construção de carrocerias, a aplicação de CAD e CAE (simulações) [8] no desenvolvimento dos meios de fabricação [7] permite uma comparação entre os dados reais e aqueles dados que deveriam ter sido obtidos nas peças da carroceria (simulação). Em CAD/CAE podem ser desenvolvidos processos de cálculo específicos, que proporcionam uma representação gráfica na tela do computador das diferenças entre as peças. Atualmente, na fabricação moderna de automóveis são empregados dois sistemas diferentes no processo em cadeia CAD/CAM/CAE para ferramentas de série. Os dados para a construção da carroceria automotiva, a geometria de conformação das peças e a programação CNC são implementados no próprio sistema CAD/CAM, desenvolvido especificamente para isso.

2.5 Simulação da Conformação de Chapas como Ferramenta Integrada no Processo de Desenvolvimento de Carrocerias Automotivas

2.5.1 Utilização das simulações no processo de desenvolvimento da carroceria

Juntamente com a noção de “*processo de desenvolvimento*” em cadeia, serão descritos os desdobramentos das atividades do desenvolvimento dos componentes construídos e os respectivos meios de fabricação, até a finalização de uma carroceria completa e seu acabamento

em chapa, antes do envio da mesma para a pintura, seguindo o fluxo normal no processo de montagem e fabricação até gerar um veículo completo [2,4,6,8]. Os pontos a serem observados no processo de desenvolvimento estão representados na coluna esquerda da figura 3-1, sendo que, à direita, temos a representação das tecnologias aplicadas como “*output*” das simulações na cadeia de análise. Para a efetividade da técnica em CAD empregada no processo, o posicionamento e integração na evolução do desenvolvimento do produto são decisivos. Para outras técnicas empregadas no desenvolvimento com suporte numérico das ferramentas de conformação (Figura 3-1), esse posicionamento é eficaz. A ancoragem da simulação em todos os seus possíveis campos de aplicação e conexões com técnicas próximas (capacidade produtiva, flexibilidade de sistemas, novas tecnologias de conformação, etc...), demonstra que estas simulações ainda possuem um longo caminho de aplicações, ainda mais com o advento de novas tecnologias de construções automotivas (gerações denominadas “*Ultra-light*” ou construções leves). Além disso, a simulação numérica pode ser empregada em diversas áreas correlatas ao desenvolvimento do produto (carroceria) e no desenvolvimento dos meios de fabricação em toda a sua evolução, através da chamada “Engenharia Simultânea” (figura 2.1), o que aumenta sua relevância.

A simulação de estampagem tem alto potencial de aplicação no desenvolvimento de componentes obtidos partindo-se de chapas planas, dentro do processo de desenvolvimento na cadeia automotiva (especificamente na carroceria). Suas possibilidades como ferramenta de análise vão desde emprego no planejamento produtivo, até a construção dos meios definitivos de fabricação [7] e [8]. Para atender às amplas exigências do emprego no processo em cadeia, tornou-se necessário desenvolver métodos de integração no processo, assim como foi necessária a adaptação de modelos de dados e otimização dos processos de cálculos, principalmente no que se refere ao tempo de processamento computacional.

A contribuição dos cálculos numéricos pode ser comprovada no sucesso das simulações de componentes da carroceria empregadas, por exemplo, na conformação de peças críticas ou na otimização dos processos de fabricação.

Com o resultado realmente efetivo, mostra-se sua aplicabilidade, por exemplo, na pré-otimização das ferramentas para peças estampadas de chapas de materiais relativamente novos aplicados a construções automotivas (alumínio, aços especiais de alta resistência (Dual-Phase ou TRIP) ou *Tailor-Blanks*) ou por novas tecnologias de fabricação (como, por exemplo, hidroconformação). A Figura 2.3 apresenta os usos do cálculo numérico e da simulação no processo de desenvolvimento de carrocerias automotivas.

Fig 2.3: Usos da simulação no processo de desenvolvimento de carrocerias automotivas

2.5.2 Aplicação das simulações de conformação de chapas

No início, a técnica utilizada pelo fabricante automotivo no domínio da fabricação era a simulação direta com o uso da estampagem (figura 4-1), a partir de uma geometria já existente ou já aprovada pela engenharia do produto [7-10]. Este tipo de emprego da simulação restringia o alcance do trabalho dos engenheiros de ferramental ou projetistas de métodos a poucas variáveis visto que, sistematicamente, pouco ou quase nada se conseguia fazer com os resultados. Isto ocorria em parte devido ao longo tempo de processamento, que inviabilizava a tomada de decisões e a obtenção da resposta sobre o que modificar, seja no processo, seja na geometria do produto. Quase nada se conseguia alterar na condição geométrica do produto, uma vez que este já era tido como definitivamente aprovado pela engenharia de produto. O foco ficava mais na otimização do processo (parâmetros) de produção ou modificação na condição do ferramental (balanço de plano, direção de repuxo, fluxo de material – direção - para dentro da matriz, etc.). Pouco ou quase nada se fazia em termos de modificação do produto final (simulação de variedade de modelos). Normalmente, utilizava-se somente uma variante obtida a partir do plano de métodos estabelecido, obtendo-se como resultado dados que, muitas vezes, nada ou quase nada representavam em relação à qualidade da geometria do componente a ser obtido [8-10].

Hoje, a simulação é empregada de modo muito mais proveitoso. É possível simular as várias fases do processo. A partir da avaliação dos resultados, são feitas adaptações nos parâmetros do processo (corte do *blank*, força no prensa-chapas,...) ou modificações da geometria da ferramenta. A simulação contribui definitivamente para assegurar a efetividade da ferramenta em série, uma vez que torna possível gerar virtualmente os componentes com os requisitos ideais de qualidade para a construção de carrocerias. Antigamente, a definição do plano de métodos era baseada na experiência dos projetistas seniores através do uso de ferramentas experimentais, bem como a partir de critérios de avaliação quantitativos (Figura 2.3), obtidos a partir de experimentos altamente dispendiosos (Tryout). Nesse sentido, o potencial do uso de simulações consiste em reduzir a utilização de ferramentas experimentais, diminuindo assim os custos com a fabricação do ferramental e aumentando a qualidade dos componentes fabricados.

O emprego de simulações na construção de ferramentais de estampagem é também essencial para a aceitação de uma nova técnica de construção ou gerenciamento de projetos em CAD, pois torna possível realizar uma análise esquemática, na qual o resultado da simulação de conformação suporta o desenvolvimento de componentes para a construção de carrocerias monobloco a partir de chapas planas.

A simulação fornece direções objetivas não somente para o processo de desenvolvimento do meio de fabricação (ferramenta), mas também sob o ponto de vista da manufatura, variantes de possíveis geometrias da peça construída durante o processo de design do veículo ou de desenvolvimento. Assim, a simulação oferece a possibilidade de se considerar os critérios quantitativos de capacidade de fabricação e, com isso, chegar a decisões seguras.

Mesmo durante a construção da peça em CAD, as zonas problemáticas sob a ótica da manufatura podem ser exibidas [11]. Depois da avaliação em CAE, podem-se antecipar modificações construtivas que se mostrem necessárias à melhoria da qualidade de fabricação, de acordo com necessidades do momento.

Nos processos atuais, geralmente não está à disposição do engenheiro de produto um esboço do processo de estampagem, neste momento conhecido somente pelo engenheiro de manufatura (O engenheiro do produto não conhece o plano de métodos do engenheiro da Engenharia de Manufatura). As respostas a estas desvantagens estão nos próprios agrupamentos da simulação. Junto das contribuições do desenvolvimento existentes, a simulação pode mostrar não somente mais rapidamente o perímetro de deformação na peça estampada, mas também para contribuir no projeto da ferramenta de estampagem (metodologia e critérios construtivos da mesma).

Durante as rotinas, isto é, no início do trabalho da ferramenta de simulação, os cálculos das variantes podem fornecer critérios de decisão adicionais para a escolha apropriada das dimensões do componente [11-13]. Deste modo, os gastos dispendidos com o ferramental podem ser assegurados, uma vez que o cálculo contribui efetivamente para a preparação de resultados orientados nas fases de desenvolvimento do produto [8-11,13].

3 Análise Experimental Comparativa entre Métodos Teóricos e Práticos

3.1 Introdução aos Métodos Propostos e Objetivos

A seguinte metodologia apresentada neste trabalho tem como um de seus objetivos se rever o termo “Engenharia Reversa” proposto nos últimos anos, especialmente sob a ótica dos processos utilizados nas casas construtoras automobilísticas, no que se refere à fabricação de componentes estampados para a armação de carrocerias automotivas. Isso significa então que, em toda a cadeia de desenvolvimento o conhecimento técnico e as experiências práticas serão também utilizados na definição do processo de fabricação dos componentes. Como consequência da aplicação desta cadeia, o tempo de desenvolvimento se reduz e o valor qualitativo e agregado ao produto tenderá a aumentar. Para a cadeia descrita acima, a pergunta que se faz neste ponto é: qual é o papel fundamentalmente exercido pelo Plano de Métodos e pelo uso de Simulações Computacionais aplicadas? [7,13-14]. A resposta pode ser dada basicamente a partir de três pontos principais, como segue:

Primeiro ponto: segundo a prática hoje aplicada ou exercendo um comparativo em termos “práticos” a respeito dos resultados obtidos do tryout de um determinado componente, temos uma figura clara com os resultados de uma simulação ou de um determinado software. Nos departamentos técnicos internos das empresas interessadas, através de critérios de qualidade e produtividade, o resultado destas simulações é então verificado. A seguir, o estado momentâneo do trabalho pode ser avaliado e os resultados técnicos esperados podem ser comprovados ou não. Mas, daquilo que se verifica hoje entre a qualidade percebida do componente físico, e a dimensão característica desta, que representa o resultado da simulação, verifica-se frequentemente um déficit segundo a prática, o que significa que, muitas vezes, simulações deverão ser refeitas, com novos parâmetros ajustados muitas vezes, sem a experiência ou a visão “prática” do processo, de forma a obter-se ao final um resultado que satisfaça os critérios de projeto e produtividade de um determinado componente, com desperdício de tempo e capacidade (tentativa e erro) [14].

Segundo ponto: deve-se levar em conta o resultado técnico e análises que se poderá obter com a avaliação geométrica do componente obtido, especialmente na fase inicial de construção e ajuste do ferramental de estampagem (*tryout*) deste, através da digitalização desta geometria obtida e a correta utilização de ferramentas tecnológicas (Softwares) para o tratamento e avaliação destas imagens. Seguindo esta lógica, a partir do resultado obtido, modificações serão implementadas e reavaliadas seguindo sempre a mesma lógica. Mas é nesta linha que o chamado Plano de Métodos utilizado para a construção do ferramental se difere do resultado obtido com a série ou é aqui que este falha. Como exemplo temos que: da prática já se sabe que diversos raios e cantos (bordas) da ferramenta deverão ser modificados ou aliviados, de forma a remediar ou prevenir certas formações indesejáveis no componente (como, por exemplo, rugas e/ou o rompimento do componente em suas partes críticas), durante a fase de ajuste deste ferramental, de forma a obter-se um fluxo produtivo para produção em série de componentes a partir desta ferramenta. Estas modificações são, na maioria dos casos, conduzidas pelo ferramenteiro encarregado de construir o mesmo, ou seja, em âmbito totalmente pessoal, baseado na sua experiência (prática). Esta “prática” ou esta alteração geométrica poderá somente então ser interpretada e descrita corretamente no modelo matemático e reverso à geometria, através da digitalização da superfície do ferramental.

Terceiro ponto: para toda simulação executada, a visão correta e necessária, é que seja construído um banco de dados de simulações e de suas respectivas análises e resultados, de forma que este “inventário do conhecimento” possa ser utilizado em desenvolvimentos futuros. Hoje, se essa prática fosse comum, ter-se-ia um banco de dados extraído da “prática”, que coligasse estes dados futuramente aos planos de método, em outras análises ou simulações. Seguramente, esta prática também pode levar a uma redução no tempo entre projeto-construção do ferramental, tendo como consequência desta a redução do custo. Na Figura 3.1, podemos verificar a representação esquemática da sequência desta cadeia de processo [15].

Figura 3.1: Posicionamento dos resultados na cadeia de processo

Sintetizando os pontos acima citados, é de suma importância a criação e definição de uma técnica que possa garantir a sustentabilidade desta cadeia de prática-conhecimento, entre definição de processo e definição de produto, garantindo, principalmente, agilidade (tempo de desenvolvimento da manufatura), precisão, redução de custo e incremento qualitativo no projeto e construção de ferramentas de estampagem para utilização na indústria automobilística e afins. Hoje, em qualquer casa automobilística, devido à alta competitividade dos diversos segmentos e mercados, a redução de tempo nos prazos e cronogramas internos de desenvolvimento de novos projetos tornou-se uma prática comum. As empresas são, cada vez mais, obrigadas a reduzir prazos e custos, ao mesmo tempo em que devem buscar cada vez mais a qualidade do produto. Portanto, a técnica apresentada neste trabalho vai ao encontro das reais necessidades do mercado. Não há mais tempo para a construção de ferramentais e ajustes dos mesmos em termos de “tentativa-erro”. Atualmente, as simulações de estampabilidade, graças à aplicação do Método dos Elementos Finitos (MEF), tornaram-se extremamente robustas, confiáveis e velozes. Mas, ainda falta um elo nesta cadeia a ser formado entre o resultado destas simulações e o resultado obtido do *tryout* prático, de forma a consumir plenamente o que chamaremos avante de “Tryout Virtual Pleno”, ou seja, a interação entre a prática e o conhecimento obtidos, fechando o elo final nesta cadeia.

Este trabalho foi realizado baseando-se na análise de diversas situações de desenvolvimento industrial, com componentes automobilísticos, a partir de processos de desenvolvimento, fabricação, ferramentais (estampos) e simulações reais, hoje aplicados a diversos veículos em circulação em vários mercados globais. Diversas técnicas de simulações de estampagem utilizando-se dos mais diversos softwares disponíveis no mercado foram avaliadas, assim como foi verificada sua utilização em algumas casas automobilísticas. Isto foi necessário para que a técnica pudesse ser desenvolvida, de forma a cobrir grande parte da aplicação filosófica dos resultados das simulações. O tryout ou ajuste fino do ferramental, outra técnica importante aqui, foi também avaliado em diversas casas, não só na automobilística, mas também em construtores especializados que, na sua maior parte, trabalham focados no mercado automobilístico. Todo o trabalho foi desenvolvido utilizando-se de meios tecnológicos e softwares de última geração disponíveis no mercado.

A técnica aqui a seguir apresentada se focará em dois pontos principais: o primeiro ponto será a definição de quesitos para a construção e definição de um modelo matemático para aplicações em simulações de estampagem; o segundo ponto será a interação técnico-prática utilizada para criar condições reais de realização de um tryout “virtual”, a partir da digitalização e análise da geometria do produto físico final, obtidas através da aplicação de um sistema de medição fotogramétrico e da análise de suas imagens. Todas as informações obtidas na pós-análise serão armazenadas em um banco de dados para aplicações futuras, tal como descrito no terceiro ponto, mas que não será o foco principal deste trabalho.

4 Modelagem do processo real de conformação em um modelo simulado

4.1 Conceitos de ‘Simulação da Estampagem de Chapas’

O modelo real baseado na prática construtiva deve ser convertido em um modelo matemático. Primeiramente se estabelece uma definição para tal modelo: *“Um modelo é a reconstrução ou representação refinada de um objeto real ou de um determinado processo, em um mesmo sistema de referência”* [4,15].

Figura 4.1: Representação esquemática do conceito de modelagem

A descrição deste modelo de processo e/ou produto com a ideia de utilização em uma determinada causa deverá conter a descrição exata deste processo e/ou produto. Esta descrição exata deverá ser garantida de modo a manter todas as suas características físicas, químicas, geométricas e suas interações, garantindo a discretização matemática deste sistema. Condições de contorno serão definidas ou desconsideradas, dependendo do grau de utilização e complexidade do sistema. O objetivo desta fase é criar um modelo teórico que contemple os fenômenos a serem estudados, e a recíproca aplicação destes no modelo prático, portando assim a um avanço significativo do conhecimento de ambos os modelos.

No conceito de simulação dos processos de conformação de componentes de carrocerias automotivas, o ponto principal foca-se na estampabilidade/conformabilidade do componente e suas propriedades mecânicas em geral. A descrição destes fenômenos dá-se, em geral, com o uso do método dos elementos finitos (MEF) onde, devido à complexidade dos modelos, diversas condições de contorno não são consideradas nos modelos matemáticos (muitas vezes de forma necessária), com o objetivo de reduzir o custo e o tempo empregados em tais simulações.

Partindo-se então de um determinado processo de conformação mecânica, todas as operações relacionadas ao fenômeno deverão ser verificadas e listadas, a fim de criar uma primeira visão sobre sua influência sobre a simulação/estudo a ser realizado. Através de avançadas simulações e cálculos na construção de meios de fabricação [3,6], hoje é plenamente possível calcular importantes dados e parâmetros para o acerto (tryout) na estampagem dos diversos estágios de conformação, de modo que já nos primeiros passos de utilização da ferramenta, somente pequenos acertos serão necessários nos parâmetros da prensa ou na estampagem. Pressupõe-se a utilização de uma prensa com comando numérico e controle eletrônico dos parâmetros principais de estampagem, conforme descrito na Figura 4.2.

Para que isso seja possível, outros parâmetros de modelagem do processo de conformação como qualidade da chapa, acabamento superficial e composição química da mesma devem ser medidos e também normalizados. Para a simulação de uma peça obtida por estampagem profunda, deve ser conhecido o contorno da ferramenta com todos os dados técnicos relevantes. Para a preparação geométrica utiliza-se, conforme os objetivos, o conjunto de dados da estampagem, construída com o auxílio de CAD e a discretização da matriz e punção para gerar a superfície da ferramenta, acrescentando-se, eventualmente, o conjunto de dados do prensa-chapas, considerando-se sempre os respectivos raios da geometria do componente, e modelando os mesmos na superfície do modelo matemático gerado no CAD [8-9]. Deste modo, o próprio objeto de cálculo, o *blank*, será incluído e gerado como uma malha de elementos finitos para o primeiro estágio da simulação.

Assim como o processo, o modelo do produto poderá também ser aperfeiçoado e refinado. A partir das informações disponíveis ao processo (Figura 4.2) outros parâmetros poderão ser levados em consideração na modelagem. Um ponto em que as atuais simulações não avançam é na questão de se contemplar no cálculo toda a rigidez do conjunto máquina-estampo que, devido à alta complexidade de modelagem, não é considerado nos atuais modelos. Também na questão da modelagem do atrito, o modelo comumente adotado na maioria dos casos é o modelo simplificado de *Coulomb* [10] e [11].

Figura 4.2: Controle da entrada de dados (parâmetros) para as simulações de estampagem (Conceito).

Uma descrição matemática mais aprofundada deste ferramental, considerando-se o fator de comportamento elástico-deformação não é possível no atual estágio da tecnologia, sendo este modelado como apenas um corpo rígido. Todo o mecanismo, porém, pode ser modelado, a exemplo do prensa-chapas e a utilização (ou a modelagem) de mecanismos especiais de conformação (como, por exemplo, flangeamento). Contudo, mesmo considerando os fatores limitantes citados anteriormente, hoje é possível obter um resultado extremamente positivo nas simulações, em comparação com os resultados obtidos na prática processual. A transformação da geometria de uma ferramenta existente em um modelo matemático dá-se a partir de sua digitalização. As forças de repuxo no punção, bem como as forças aplicadas no prensa-chapas, serão calculadas e representadas no plano de fabricação do componente. Esta relação está representada na Figura 4.3, definindo uma interface processo-modelo matemático.

Existe ainda uma consideração da prática, em que os modelos devem ser refinados com base na análise dos resultados obtidos na simulação. Este refino, muitas vezes baseado na convergência e coerência entre prática e simulação, é baseado na experiência do executor da simulação (tentativa e erro), em relação aos resultados obtidos.

Figura 4.3: Interface processo-modelo matemático

Neste trabalho, duas considerações a respeito dos modelos de simulação de estampagem serão analisadas. A primeira será feita em função dos dados geométricos construtivos da superfície do ferramental (CAD) e a disponibilização do formato de dados. A segunda será feita em função da análise dos diversos estágios de conformação no processo de fabricação do componente.

5 Modelagem Matemática: Modelo virtual e Definição dos Critérios Analíticos ao Método de Estampagem em Relação ao Processo Real

5.1 Digitalização da Ferramenta – Determinação Fotogramétrica das Coordenadas de Posição do Modelo

De forma a poder transportar o know-how obtido da “prática” ao modelo matemático, será necessário levar em consideração a geometria final do ferramental (estado final desta), de forma a poder utilizar estes dados como input ao modelo matemático. Através da utilização da Fotogrametria, a posição de um ponto no espaço 3D pode ser determinada através de uma técnica chamada de triangulação múltipla de feixes de observação, Figura 5.1. Se a orientação espacial de cada um destes feixes é conhecida no sistema de coordenadas do objeto, então as intersecções destes raios fornecem a desejada coordenada do objeto visualizado, como na Figura 5.1, com o sistema de fotogrametria da GOM® [45-47].

5.1.1 Modelo de Câmera

O modelo de câmera é utilizado para descrever a projeção de um objeto 3D através de uma imagem plana de uma câmera. Este modelo é baseado em uma perspectiva projetada através da lente da câmera. Um objeto com um ponto qualquer posicionado em $P(X_P, Y_P, Z_P)$ e a sua posição de observação $p(x_p, y_p)$ na imagem gerada no plano B, bem como o centro de projeção $O(X_O, Y_O, Z_O)$ estão todos em uma determinada linha de projeção, como se evidencia nos modelos representado nas figuras 5.1 e 5.2. Nestes modelos, ainda temos as seguintes orientações:

- B Imagem Plana
- C *Distância Principal*
- x, y *Sistema de coordenadas da Imagem*
- x_H, y_H *Coordenadas da imagem do ponto principal*
- x_P, y_P *Coordenadas da imagem do ponto projetado do ponto objeto “P”*
- X, Y, Z *Sistema de coordenadas do Objeto*

- X^*, Y^*, Z^* *Sistema de coordenadas auxiliares*
- X_O, Y_O, Z_O *Coordenadas do Objeto do centro de projeção “O”*
- X_P, Y_P, Z_P *Coordenadas do Objeto do ponto de observação do mesmo*

Figura 5.1: Determinação das coordenadas do ponto objeto P_i através do método de feixes de triangulação de diferentes planos de imagem B_i .

As relações entre as coordenadas do objeto e da imagem [16] podem ser descritas matematicamente de acordo com a seguinte hipótese:

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \end{bmatrix} = \frac{-c}{Z_p} \cdot \begin{bmatrix} X_p^* \\ Y_p^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_H \\ y_H \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} dx \\ dy \end{bmatrix} \quad [5.1]$$

$$\begin{bmatrix} X_p^* \\ Y_p^* \\ Z_p^* \end{bmatrix} = R \cdot \begin{bmatrix} X_p & -X_0 \\ Y_p & -Y_0 \\ Z_p & -Z_0 \end{bmatrix} \quad [5.2]$$

Onde:

- $X_P, *, Y_P, *, Z_P^*$ *Coordenadas Suporte para o ponto objeto “P”*
- dx, dy *Distorção das Lentes*
- R *Matriz de Rotação*

Certos parâmetros da câmera, tais como a distância principal C , as coordenadas do ponto principal (x_H, y_H) e dos elementos de descrição da distorção das lentes da câmera são chamados de orientações internas do sistema. Os valores para o centro de projeção (X_O, Y_O, Z_O) e a matriz de rotação R , a qual depende da posição da câmera no sistema de referência global do sistema de coordenadas, define a orientação externa do sistema. A matriz ortonormal de rotação é então utilizada para a transformação do sistema de coordenadas global em sistema de coordenadas de suporte.

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad [5.3]$$

5.1.2 Sistema de ajuste de feixes

O sistema de ajuste dos feixes é utilizado para determinar as coordenadas desconhecidas do objeto e, adicionalmente, os parâmetros de detecção do mesmo. Para isso, múltiplas observações de diferentes direções são requeridas, inclusive com a sobreposição parcial de certas áreas. Além disso, é necessário que os pontos do objeto existam em mais de um ponto de observação. Um mínimo de duas observações de um único ponto objeto é necessário para criar equações suficientes para a derivação desta posição. O sistema de coordenadas pertinente ao objeto posicionado no centro de projeção define os chamados raios de projeção, tal como ilustrado na figura 5.2. O objetivo deste sistema de ajuste é determinar o parâmetro desconhecido, de tal forma que as hipóteses colineares sejam dadas como possíveis e existentes. O sistema de equações pode não ser resolvido exatamente se existirem mais observações do que parâmetros, ou as observações contiverem erros relativos ao seu processo de detecção por parte das câmeras.

Um processo iterativo se faz então necessário para a aproximação destas equações. Se todos os parâmetros de detecção ou de setup do sistema são desconhecidos, então significa que temos sete graus de liberdade no sistema de equações, ou seja, três destes graus descrevem a translação, outros três descrevem a rotação e um último descreve a escala. Esses graus de liberdade, que são chamados de “observações adicionais”, devem, portanto, ser restritos [17] e [18].

Figura 5.2: Projeção Central

5.1.3 Marcadores Circulares

De forma a caracterizar os pontos da imagem na figura gerada pela câmera, utilizaremos referências de posição que chamaremos de marcadores circulares, que serão aplicados na

superfície do objeto ou na área adjacente a este. Os seguintes critérios devem ser levados em consideração para a escolha destes marcadores:

- Alta precisão em função da determinação da posição;
- Identificação automática;
- Fácil confecção e manuseio em fotogrametria.

Para a determinação das coordenadas de um marcador ou de uma referência utilizando a metodologia de ajuste de feixes, os marcadores circulares devem identificar inequivocamente as diversas imagens, de forma que uma sempre é referência em relação a outra e assim sucessivamente (Figura 5.3).

O objetivo será promover uma identificação automática, de forma a futuramente a eliminar erros e desperdício de tempo em buscas.

Figura 5.3: Peça conformada preparada para a medição. Os marcadores codificados permitem à câmera fotografar de diversos ângulos, sobrepondo, assim, uns aos outros.

Para estabelecer então um código de identificação entre estes marcadores circulares, um anel especial codificado foi desenvolvido para este fim. O código representado nos anéis corresponde a um código binário, onde a posição do círculo em cada anel corresponderá a um sinal diferente de um marcador ao outro. A vantagem é que estes marcadores podem ser facilmente reproduzidos

em uma impressora laser standard e, mesmo assim, a identificação da imagem permanece visível [45,47].

A metodologia de digitalização utilizada para a condução deste trabalho será aqui, neste ponto, discutida brevemente. No desenvolvimento deste trabalho será empregado o sistema de digitalização ATOS®, que é atualmente empregado pelas OEM como instrumento de medição e de análise metrológica. O sistema utilizado foi um scanner ATOS® standard, composto de cabeçote de medição, acoplado a um projetor de frestas, o qual projeta sobre a superfície do ferramental diversas frestas ou franjas, que são captadas por duas câmeras montadas e posicionadas no cabeçote, conforme a Figura 5.4.

Figura 5.4: Composição e operação do scanner fotogramétrico ATOS®.

De forma a obter-se um melhor resultado, a superfície das peças e do ferramental de análise será pulverizada com um meio contrastante, a fim de melhorar notadamente a característica refletiva da superfície. O resultado obtido com a aplicação deste contraste, assim como a projeção das faixas sobre a superfície da ferramenta, pode ser verificado na Figura 5.5.

Figura 5.5: Superfície do ferramental. Evidencia-se a coloração esbranquiçada resultante da aplicação do meio contrastivo, bem como na região clara ao fundo se verificam as franjas projetadas.

Na digitalização de componentes ou em ferramentais de grandes dimensões, outra técnica se faz necessária. É preciso dividir a superfície em secções ou zonas, que serão evidenciadas com os marcadores circulares já descritos e registradas uma a uma, tal que posteriormente possam ser unidas como um todo através do software TRITOP®, formando assim a superfície completa do ferramental ou da peça. Essas marcações funcionam como um código eletrônico de posição, de tal forma que o software posteriormente recoloca e remonta as fotografias digitais destas superfícies, apenas tendo como referência o “marcador” digital. A representação destes marcadores na superfície do ferramental se evidencia na Figura 5.5. Com o software TRITOP®, estas marcações digitais são reunidas e localizadas automaticamente, obtendo-se como resultado primário de toda esta operação como uma nuvem de pontos, que representa a superfície da ferramenta. Todo o tempo de processamento da digitalização depende em primeira instância das dimensões do componente ou do ferramental. Para a ferramenta de estampagem de uma porta automotiva, a duração do evento de digitalização da superfície é de cerca de seis segundos.

A partir da digitalização, uma grande quantidade de pontos será registrada no sistema. Em sequência, estes dados primários serão copiados e enviados para outro sistema, onde serão retrabalhados em programas como, por exemplo, ICEM-Surf®, CATIA® ou UniGraphics UG®. Em geral, os dados serão armazenados e salvos em formato STL, ou seja, um formato que a maioria dos programas CAD disponíveis no mercado aceitam como interface de dados. Para o propósito de utilização neste trabalho, os softwares aqui utilizados INDEED® e AUTOFORM® possuem a interface disponível para processamento direto, não sendo necessária nenhuma outra interface intermediária entre a digitalização e o processamento [19] [20] [21] [29].

5.1.4 Análise do Formato de Dados “STL” e Variações da Geometria

Uma vez carregados os dados da digitalização no programa de simulação, obtém-se toda a superfície do ferramental em forma de pontos que, unidos, definem formas triangulares e, conseqüentemente, formarão os chamados “*patches*” (retalhos) [45] e [47]. A quantidade destas formas triangulares ou destes “retalhos” será diretamente proporcional à quantidade de pontos gerados durante a digitalização. Ou seja, quanto mais formas forem definidas (ou patches), maior será a resolução da superfície e, conseqüentemente, maior será a dificuldade para seu processamento. Também é um fato ligado diretamente à capacidade de processamento do sistema computacional utilizado. De forma a aperfeiçoar a quantidade de dados processados, é possível utilizar a chamada “*técnica primaria*”, que refina e discretiza o processo. Existem programas disponíveis no mercado como o POLYWORKS®, o sistema CATIA® ou ainda o UniGraphics-UG® que facilmente podem modificar essas superfícies em modelos discretos.

Figura 5.6: Superfície do ferramental. Marcadores digitais posicionados sobre a superfície, de forma a criar zonas fotogramétricas interligadas e posicionadas em um mesmo referencial.

Essas modificações são geralmente feitas com base em dois critérios que apresentaremos aqui. O primeiro critério é chamado de erro de “offset” (ou critério de deslocamento) e o segundo, chama-se de critério angular. Com o auxílio de uma representação geométrica, os dois critérios podem ser facilmente explicados.

Considerando-se a primeira modificação a realizar-se do ferramental, a descrição do procedimento dá-se da seguinte forma: Para a avaliação qualitativa da superfície criada, é feita uma comparação do refinamento entre a geometria de base (definida como a geometria de partida), que é também composta de diversas formas geométricas triangulares, e a nova geometria criada através da digitalização da superfície do ferramental, com uma nítida redução na quantidade de formas geométricas triangulares. Então, determina-se certo valor que exprime o quanto a “nova” geometria pode variar em relação à geometria de partida.

No esquema representado na Figura 5.7, tal critério pode ser verificado detalhadamente. Em cor escura, observa-se a geometria de base, em amarelo representa-se a geometria recriada a partir da digitalização efetuada com um número reduzido de elementos geométricos. O erro de offset será caracterizado através da medida da distância entre as duas linhas geométricas na zona de raio. Para este valor será imposto um critério máximo de deslocamento, que não poderá ser superado. Se caso o modelo criado a partir da digitalização superar este valor, então a superfície criada deverá ser redefinida com um número maior de elementos [48-51].

Figura 5.7: Representação esquemática do offset ou erro de deslocamento.

Para o segundo critério, que chamaremos de critério angular, representado na Figura 5.8, será tomado como referência o ângulo formado entre dois elementos triangulares da superfície digitalizada. Como critério, este ângulo deve ser sempre observado para que permaneça alinhado ao interno da superfície externa, descrevendo com perfeição a mesma. Caso um determinado ângulo, dado por uma determinada geometria, superar o ângulo máximo pré-determinado, então, da mesma forma como no critério offset, a superfície deverá ser redefinida com um número maior de elementos, de forma a preencher o critério estabelecido. Para determinar o valor máximo para este ângulo, pode-se tomar como referência o raio externo da superfície de partida. Se, por exemplo, este ângulo for definido como tendo um máximo de 25° , isto significa que um determinado raio deverá ser descrito com um número tal de elementos.

Caso seja adotado como critério um valor angular menor, então para o mesmo raio do exemplo anterior, o mesmo deverá agora ser descrito com um número maior de elementos. Com isso se obtém uma geometria melhorada da superfície, com um melhor acoplamento entre os elementos que a descrevem [48,50].

Figura 5.8: Representação esquemática do critério angular com superfície recriada a partir do software POLIWORKS®.

Na Tabela 1, podemos verificar comparativamente a quantidade de elementos triangulares criados a partir da malha de superfície, utilizando-se dos diversos critérios possíveis disponíveis ao usuário a partir do software POLIWORKS® (Figuras 5.7 e 5.8). A quantidade representa a digitalização da superfície da matriz.

Os resultados apresentados na Tabela 1 podem visualmente ser verificados nas Figuras 5.9(a) e 5.9(b). A Figura 5.9(a) mostra uma secção obtida da matriz deste estampo, composto de 448000 elementos. A Figura 5.9(b) mostra a malha modificada, considerando-se como critério um erro de deslocamento (offset) de 0,04 [mm] e um critério angular de 15°. Os elementos desta superfície podem, segundo os critérios disponíveis, ser reduzidos até um máximo de 88000 elementos triangulares [48,52].

Tabela 1 - Quantidade de elementos da superfície da matriz com superfície recriada a partir de critérios geométricos disponíveis no software POLIWORKS®

Descrição	Quantidade de Elementos
Malha de superfície de partida	448000
Modifica Erro de deslocamento: 0,02 [mm] Critério Angular: 7,5°	163000
Modifica Erro de deslocamento: 0,02 [mm] Critério Angular: 15°	145000
Modifica Erro de deslocamento: 0,04 [mm] Critério Angular: 7,5°	122000
Modifica Erro de deslocamento: 0,04 [mm] Critério Angular: 15°	88000

Figura 5.9(a)/(b): Representação da superfície de partida (a), com 448000 elementos, e a versão modificada com o software POLIWORKS® (b), com 88000 elementos.

5.2 Formatos de Arquivos Eletrônicos

5.2.1 Formatos Disponíveis

Ao contrário do formato descrito no capítulo anterior que apresenta um modelo matemático de uma superfície discretizada em elementos triangulares (**STL**), o formato difuso também pode ser empregado. O formato **VDAFS** descreve o modelo através de diversas superfícies com suas curvas elementares. Basicamente, a diferença entre estes dois formatos se encontra na definição de um sobre o outro. Normalmente, em atividades relacionadas ao uso de digitalização em prototipagem rápida, o formato STL mostra-se vantajoso como, por exemplo, no emprego de um processo de prototipagem rápida chamado de Litografia Estéreo (daí a abreviação de **STereo Litografia**). Uma vantagem deste formato é que, mesmo em atividades correlatas a superfícies

geométricas bastante complexas, a descrição destas com elementos triangulares tornam-se extremamente eficaz. Esta representação geométrica torna-se, então, por sua vez, extremamente fácil de ser transportada para qualquer software de CAD, para ser retrabalhada e reutilizada. Dados em STL podem também ser utilizados em programas de CAM para posterior utilização em fresagem de novas superfícies ou cópia de ferramentas, em caso de necessidade de duplicação de estampas ou em casos onde um estampo seja rompido [24] [25].

O formato VDAFS é um tipo de representação de dados que foi desenvolvido para utilização no âmbito das indústrias automobilísticas alemãs, e significa Verein Deutscher Automobilhersteller – Flaechen Schnittstelle (“*União das Indústrias Automotivas Alemãs – Posição da Superfície*”). Basicamente, é um formato neutro de representação geométrica de superfícies, que as representa e à sua curvatura principal. Pode ser aplicado com resultados excepcionais em superfícies de alta complexidade geométrica (superfícies livres geométricas como, por exemplo, superfícies de carrocerias automotivas). A vantagem principal deste tipo de formato é a alta capacidade de intercâmbio de dados entre diversos sistemas CAD-CAM-CAE sem nenhuma perda qualitativa de informações matemáticas. A diferença exata entre os dois formatos pode ser verificada nas Figuras 5.10(a) e 5.10(b). Em ambas as figuras têm-se a representação de um corpo embutido. Na Figura 5.10(a) se verifica para a geometria descrita a interpretação dos dados matemáticos no formato VDAFS, enquanto na Figura 5.10(b) temos a representação dos mesmos dados no formato STL. No formato VDAFS, a superfície representada com a cor laranja vem delimitada por outras duas curvaturas internas, definindo e delimitando, assim, o diâmetro do corpo. Uma modificação na geometria para o aumento desta superfície externa (laranja) é possível apenas com o aumento das curvas internas, delimitando novamente o diâmetro do corpo. No caso da Figura 5.10(b), representada matematicamente no formato STL, verifica-se que a mesma superfície já não existe, ou seja, é descrita por uma certa quantidade de elementos triangulares, assim como a curvatura interna também não existe, sendo também representada por uma série de elementos triangulares [28].

Figura 5.10 (a)/(b): Corpo representado com a geometria no formato VDA (a); com a geometria representada no formato STL (b).

Não existindo mais a curvatura interna representada como uma superfície geométrica, qualquer modificação do corpo no formato STL que seja necessária para alterar o diâmetro do corpo, somente poderá ser feita modificando-se os elementos triangulares que compõem a curvatura, aumentando consideravelmente os custos de operação. Para aumentar a curvatura no formato STL, cada ponto (nó) de cada triângulo deverá ser deslocado, de forma a redefinir a curvatura total da superfície interna.

A escolha do formato é dependente da utilização e manuseio dos dados geométricos do modelo. Se previamente já se sabe que o modelo sofrerá correções e intervenções na sua geometria, ou que raios deverão ser modificados, em virtude de análise posterior e/ou simulação, então o formato aconselhado para o modelo é o VDA.

Para converter uma nuvem de pontos ou uma rede STL em uma superfície geométrica paramétrica existem diversos métodos (baseados em softwares disponíveis no mercado) que podem ser aplicados, entre os quais o utilizado neste trabalho, que é o software PANELSHOP®. Como saída de dados do equipamento fotogramétrico, uma nuvem de pontos é criada a partir da superfície digitalizada, sendo salva em formato STL, permitindo ao programa interpretar os dados. O usuário deve então escolher a sequência de curvas de suporte para a criação da

superfície. Estas curvas ou melhor, estas superfícies definidas, serão criadas pelo computador a partir dos dados da nuvem de pontos. O resultado final será então uma superfície geométrica, tal como representada na Figura 5.11.

Figura 5.11: Função do princípio de conversão da nuvem de pontos em superfície geométrica

5.2.2 Análise dos dados de saída

A partir dos dados de saída, o usuário deve decidir qual o formato de saída de dados que vai utilizar, baseando-se sempre na questão: “Qual dos formatos é o melhor, considerando-se a prática?”. No capítulo 1.2.1.1 foi dada uma primeira visão sobre a técnica de uso direto dos dados, tendo sido abordada a questão do trabalho a ser executado. Trata-se de trabalhar com uma superfície retrabalhada de tryout do ferramental com os dados de partida do CAD, onde a mesma deverá ser analisada. Um ponto importante é verificar se os dados da superfície do ferramental são iguais ou se são diferentes dos dados da simulação de partida do componente (ou seja, da primeira simulação feita para este estampo) em relação a superfície pós-tryout, onde uma nova análise se faz necessária. Outro ponto importante da metodologia aplicada está na decisão sobre a necessidade ou não de retrabalho via software desta superfície digitalizada. Para comparar os dados diretamente, neste trabalho utilizou-se o software UniGraphics® (UG), que permite o uso de uma série de funções específicas que facilitam a análise destes dados.

A este ponto, para conduzir a análise, definiremos o que se denomina de “*janela de comparação*” entre as duas ferramentas. Esta “*janela de comparação*” é uma distância definida entre os dados das duas ferramentas. Se os dados dentro desta “*janela*” forem idênticos, então as duas geometrias da ferramenta deverão ser representadas na mesma cor.

O formato de saída STL (com a suas variações de malha e/ou nuvem de pontos) e o formato VDAFS devem ser comparados com o formato original de saída geométrica da ferramenta, que chamaremos de geometria-ZERO. Objetivo inicial é verificar entre os dois formatos se há diferenças geométricas, principalmente nas modificações realizadas na malha STL, que podem ser significativas para o uso posterior destes dados. As diferenças verificadas entre as duas geometrias poderão portar também a diferenças nos dados obtidos entre as duas simulações. Normalmente, inicia-se a verificação das diferenças entre as duas geometrias a partir de valores na faixa de 0,05[mm]. Portanto, este será o valor fixado como tolerância inicial perceptiva para o sistema.

Em termos de “janela de comparação”, o valor mínimo que poderemos utilizar, baseado em verificação experimental, será de 0,1 mm, valor este que poderá ser tomado como uma boa referência ao uso prático desta técnica. Por outro lado, o valor máximo de diferença entre as duas superfícies não poderá superar 0,4[mm], porque pode causar problemas de junção entre superfícies durante a criação do modelo geométrico em CAD. A representação deste critério se verifica graficamente na Figura 5.11. Neste exemplo de demonstração da técnica foi utilizada a geometria recuperada de um componente de uma carroceria automobilística. Os dados foram representados em VDAFS, mas partindo-se de uma malha inicial em formato STL, e utilizou-se o critério da “janela de comparação” na zona dos 0,4[mm]. Na Figura 5.12, podemos verificar que ambas as formas geométricas não apresentam diferenças nas suas superfícies, considerando a tolerância máxima de 0,4[mm] e, portanto, ambas estão representadas na cor amarela. Pela análise, verifica-se que apenas na zona periférica apresenta uma diferença que supera o critério estabelecido para a janela. Contudo, esta zona não apresenta diferença significativa para a simulação em questão e, portanto, para as zonas de interesse comum não há nenhuma diferença significativa entre ambas as geometrias. Variações abaixo de 0,1[mm] foram desconsideradas.

Figura 5.12: Comparação geométrica dos dados de partida em relação aos dados da digitalização em VDA, com base no critério “janela de comparação”

Na Tabela 2, construída com base nos mesmos critérios descritos na Tabela 1, é possível visualizar a síntese de dados obtida a partir da experiência prática de processamento de superfícies em CAD e no tempo de processamento das simulações.

Tabela 2 - Comparativo entre valores de calculo e quantidade de elementos de superfície geométricos

	Quantidade de Elementos da Matriz	Tempo de Cálculo*) INDEED® [h:min]	Tempo de Retrabalho (subjetivo) [h:min]
Malha de superfície de partida	448000	06:33	~20:00
Modifica Erro de deslocamento: 0,02 [mm] Critério Angular: 7,5°	163000	03:52	~05:00
Modifica Erro de deslocamento: 0,02 [mm] Critério Angular: 15°	145000	03:12	~05:00
Modifica Erro de deslocamento: 0,04 [mm] Critério Angular: 7,5°	122000	04:12	~05:00
Modifica Erro de deslocamento: 0,04 [mm] Critério Angular: 15°	88000	02:44	~04:00
Formato VDAFS	38000	01:21	~02:00

*) Simulação realizada em Workstation HP

Para o cálculo do tempo de simulação, considera-se o tempo de CPU (*elapsed time*). O tempo de retrabalho reflete um valor empírico baseado na experiência prévia prática com o trabalho em modelos CAD/CAE. Em outras palavras, é um número que traduz, em um modelo geométrico, o tempo necessário de retrabalho até a obtenção de um modelo “calculável” ou pronto para ser processado por um programa CAE. Este retrabalho baseia-se, principalmente, na recomposição de elementos degenerados, verificando “furos” entre elementos, taxa de aspecto e critérios estabelecidos para os ângulos máximo e mínimo internos destes elementos [25].

Em geral, o resultado demonstra que, para um aumento no número de elementos, aumenta-se também o número de horas de preparação do modelo, assim como o tempo de desempenho do cálculo da simulação. Interessante notar que um trabalho feito a partir da malha de superfície de partida (dados de partida) é desvantajoso e impraticável no âmbito industrial.

Posteriormente, como critério estabelecido de partida para os dados da simulação, é possível verificar a redução máxima da espessura da chapa obtida e o comportamento do bordo da platina (estricção). O objetivo principal destas simulações é verificar a que ponto a discretização da malha pode interferir diretamente nos resultados.

No gráfico apresentado na Figura 5.13, pode-se observar a diferença crescente no tempo de simulação, comparando os critérios representados na Tabela 2.

Na Tabela 3 apresenta-se a análise comparativa entre os formatos de saída de dados de uma simulação em função da redução de espessura da chapa em porcentagem. Como resultado desta comparação, observa-se um valor máximo de 2,2% de diferença nos resultados obtidos, variando-se apenas os critérios de construção do modelo (número de elementos descritos na construção do modelo matemático da matriz). Pelo valor numérico da diferença encontrada, constata-se que o mesmo não é claramente um valor que depende do refinamento da malha, mas sim que se trata de um valor arbitrário [26].

Figura 5.13: Representação gráfica do tempo de pré-processamento e processamento computacional (CPU), em função da quantidade de elementos para as diversas configurações de modelos matemáticos representadas na Tabela 2.

Isto pode dar lugar a uma discussão onde a diferença encontrada no resultado seria atribuída apenas a certas condições de simulação. Além disso, a diferença na retração (ou estiramento) na borda da platina em relação ao formato inicial entre um modelo e outro foi de apenas 2 mm.

Tabela 3 - Comparativo entre valores de resultado da simulação com o formato de saída de dados

	Quantidade de Elementos da Matriz	Tempo de Cálculo^{*)} INDEED® [h:min]	Redução de Espessura Máxima da chapa [%]
Malha de superfície de partida	448000	06:33	17,1
Modifica Erro de deslocamento: 0,02 [mm] Critério Angular: 7,5°	163000	03:52	18,3
Modifica Erro de deslocamento: 0,02 [mm] Critério Angular: 15°	145000	03:12	16,1
Modifica Erro de deslocamento: 0,04 [mm] Critério Angular: 7,5°	122000	04:12	16,9
Modifica Erro de deslocamento: 0,04 [mm] Critério Angular: 15°	88000	02:44	16,9
Formato VDAFS	38000	01:21	17,4

^{*)} Simulação realizada em Workstation HP

Os resultados obtidos a partir do formato de saída dos dados dos programas de CAD e simulações podem ser resumidos da seguinte forma:

- A discretização da malha de partida de dados (output), bem como a superfície inicial que dá origem a esta, demonstra baixa derivação geométrica entre si, que poderá ser desprezada;
- A discretização da malha de partida de dados (output), bem como a superfície inicial que dá origem a esta, não influenciam os resultados da simulação; qualquer diferença nestes resultados é devida à simulação em si e será considerada;
- Nota-se uma influência da discretização, principalmente no tempo da simulação e de discretização por parte do usuário. Sobre este estado de influência pode-se concluir que quanto mais elementos contêm a malha da ferramenta em INDEED[®], maior será o tempo de processamento e a dificuldade do usuário no tratamento e manuseio destes dados também aumentará.

Portanto, seguindo os cálculos, conclui-se que o melhor formato de saída de dados para uma malha modificada é o formato STL. Porém no caso apresentado neste trabalho técnico, o formato escolhido foi o VDAFS, sendo o formato disponível com maior facilidade de manuseio dos dados matemáticos em relação aos softwares empregados do desenvolvimento deste trabalho [27].

5.2.3 Modelagem dos “*Drawbeads*” (cordão esticador) ou Planos Geométricos de Retenção ao Escoamento

O segundo ponto principal na construção de um modelo é a modelagem e inserção dos *drawbeads* ou inserção de modificações de forma na geometria da superfície do estampo, necessárias para a fabricação de um determinado componente com uma geometria complexa. Quando se inicia a discussão de um determinado processo de conformação a fim de obter-se certo componente complexo estampado, a inserção ou não de “*drawbeads*” ou a alteração da geometria da ferramenta de forma a inserir meios para o controle do escoamento do material ao interno do estampo para a fabricação do componente, são dois aspectos fundamentais na definição do plano de métodos, influenciando muito o resultado final. Esta influência

seguramente modifica o resultado final em função da redução/distribuição de espessuras na geometria do componente. Diferentes aplicações, conceitos e posicionamento de “*drawbeads*”, bem como a inserção de características geométricas particulares modificam o fluxo de material ao interno dos ferramentais. Os “*drawbeads*” funcionam como uma forma de “freio” para o deslocamento de material ao interno do estampo podendo, inclusive, chegar ao ponto de bloquear totalmente o fluxo de escoamento deste ao interno do estampo, influenciando o resultado final da operação. As Figuras 5.14(a) e 5.14(b) representam aplicações típicas de inserções geométricas (a) e o clássico modelo de “*drawbead*” (b), ambos inseridos de forma a controlar o escoamento da chapa ao interno do estampo [57-58].

Inserções geométricas como as apresentadas na Figura 5.14(a) também são conhecidas como “mata-rugas”, sendo propositalmente inseridas de modo que as rugas e deformações sejam absorvidas por sua geometria, ora tornando possível controlar o escoamento pelo estiramento do material em determinadas zonas, ora podendo servir como elementos de “sacrifício”, ou seja, sendo propositalmente colocados em zonas estratégicas do estampo, tornando possível absorver rugas e deformações que, posteriormente, são eliminadas da peça com um simples corte, sem deixar qualquer traço de não conformidade na superfície do componente. Hoje, ambos os métodos tem sido combinados, proporcionando, segundo solicitação do componente, um melhor resultado em termos de qualidade superficial (acabamento) e geometria (dimensão) [29].

Os “*drawbeads*” são inseridos diretamente na geometria do ferramental e são, consequentemente, redigitalizados e transportados aos dados da simulação deste ferramental. Na atividade diária de simulação e considerando o atual standard de desenvolvimento destes programas, é possível utilizar modos próprios de inserção e modelagem dos “*drawbeads*” no software. Dependendo do programa, podem ser representados por linhas na superfície do modelo matemático (AUTOFORM[®], PAMSTAMP[®], INDEED[®], entre outros). Neste caso, posteriormente serão substituídas automaticamente por uma linha poligonal que, consequentemente, como representado da Figura 5.15, o programa relacionará com a lei de atrito escolhida como função local (modelagem em função da tensão de cisalhamento local provocada em função das forças de atrito) [23],[27],[28],[29] e [30] e que, durante o processo, atua como uma força de retenção local da chapa.

Figura 5.14: Exemplo de aplicação típica de inserção geométrica (a) e o clássico modelo de “drawbead” (b), ambos inseridos de forma a controlar o escoamento da chapa ao interno do estampo

Figura 5.15: Representação dos modelos (a) inserção geométrica e (b) “drawbead” inserido na superfície. No modelo (a) as setas indicam inserção de forma na geometria conforme secção representada. No modelo (b), a linha azul representa a cadeia poligonal inserida automaticamente via software (função disponível). O componente representado refere-se à travessa superior do teto de uma carroceria automobilística.

No programa INDEED[®], esta força é dada em $[N/mm]$, enquanto que no software AUTOFORM[®] esta força é definida como um valor, chamado de “Fator Força”. Um “*drawbead*” definido no programa INDEED[®] como elemento standard fornece uma força de $200\ N/mm$. No programa AUTOFORM[®], o mesmo “*drawbead*” standard seria correspondente a um Fator Força de 0,35. A vantagem de haver no software a possibilidade de inserção de um modelo de “*drawbead*” é que, durante a fase de análise do ferramental, pode-se inserir e modificar muito velozmente diversas composições geométricas de “*drawbeads*”. Assim, podem-se obter rapidamente decisões a respeito do resultado obtido, sem a necessidade de modificar o modelo matemático da superfície do ferramental.

Para comprovar a eficácia destes dois modelos de “*drawbeads*”, a Tabela 4 demonstra o resultado comparativo de uma simulação realizada em um confronto direto entre os modelos de inserção geométrica (fig. 5.14a) e o modelo standard de “*drawbead*” (Fig. 5.14b). Para chegar a estes resultados, considerou-se um único modelo de geometria de componente (travessa teto de uma carroceria automobilística) tendo como variável única a geometria local (inserção geométrica e “*drawbead*”), onde esta variável representa a realidade mais próxima da prática. Como critério de comparação entre ambas as variáveis, levou-se em consideração o escoamento da platina em relação ao contorno geométrico inicial desta.

Na Tabela 4 estão representados os resultados de ambas as variantes para o componente em análise. Como resultado, verifica-se imediatamente que o modelo variante com a inserção de “*drawbeads*” no cálculo, utilizando-se INDEED[®], representa a realidade mais próxima da peça estampada. A retração da platina nos lados C e D do modelo com a inserção geométrica no cálculo, de fato são muito menores do que o resultado prático obtido com a peça estampada, o que pode justificar no modelo matemático o critério que representa um nível elevado de atrito para a geometria em questão, ou seja, apresenta uma tendência maior ao bloqueio da chapa. Na Tabela 4 apresenta-se o resultado comparativo entre o escoamento da platina (em relação ao seu perímetro inicial) e da redução de espessura para os pontos mais críticos em relação aos critérios de construção geométricos da ferramenta (inserção geométrica local e “*drawbeads*”). Os pontos são automaticamente criados pelo software estando representados os valores mais críticos encontrados.

Tabela 4 - Resultado comparativo entre o escoamento da platina e da redução de espessuras

Comparativo Entre Escoamento da Platina									
Modelo com inserção geométrica local					Modelo com “drawbead”

	Lado A	Lado B	Lado C	Lado D		Lado A	Lado B	Lado C	Lado D
Peça Real [mm]	20	17	6	3	Peça Real [mm]	20	17	6	3
Simulação [mm]	17	17	13	9	Simulação [mm]	17	19	7	3

Comparativo em Relação à Redução de Espessuras													
Modelo com inserção geométrica local							Modelo com “drawbead”

Ponto	M11	M19	M27	M29	M30	M32	Ponto	M11	M19	M27	M29	M30	M32
Redução Peça Real [%]	1,0	2,0	8,0	1,0	5,0	6,0	Redução Peça Real [%]	1,0	2,0	8,0	1,0	5,0	6,0
Redução INDEED [%]	4,2	4,8	14,5	3,4	11,0	3,2	Redução INDEED [%]	2,5	2,5	11,5	2,5	6,7	9,4

Através desta sistemática, na simulação se verifica também uma maior redução de espessuras nos pontos de medição escolhidos como sendo os mais críticos na peça, em relação à prática. Esse

comportamento pode também ser esclarecido em relação à formulação relativa aos elementos de casca utilizados na simulação, onde no caso do uso de elementos do tipo membrana, esse tipo de comportamento grave não ocorreria, [26] e [30].

Os resultados obtidos com a inserção dos “*drawbeads*” são melhores em relação à prática. Na modelagem que utiliza “*drawbeads*”, alguns cuidados devem ser tomados, para obter-se melhor convergência entre dados práticos versus simulação:

- Na zona do “*drawbead*”, a peça real apresenta uma maior redução de espessura em relação à simulação. Apesar de o modelo apresentar um resultado global em um nível muito alto em relação à prática, nesta zona do modelo matemático não acontece um fenômeno que chamamos de “*mudança de forma local*”, fenômeno este que na peça real acontece devido a um escoamento local da chapa, caso que na simulação o modelo apresenta deficiências na sua reprodução. Essa “*mudança de forma*” leva, na prática, a uma forte redução da espessura.
- Na definição dos pontos de medição, estes devem ser definidos fora da zona crítica entre peça e “*drawbead*”, de forma que a comparação possa ser o mais real possível, sem considerar-se o fenômeno descrito no ponto anterior.
- A influência nos resultados, devido à deformação local dos “*drawbeads*” também causa efeito no comportamento de retorno elástico da chapa. Devido a esta deformação local da chapa (mesmo em níveis baixos de deformação), ocorre um retorno elástico do componente, a partir do momento em que passa a haver uma força local provocada pela ação elástica da mudança de forma na zona do “*drawbead*”. A Figura 5.16 demonstra este fenômeno a partir do exemplo apresentado na Tabela 4.

Figura 5.16: Representação do fenômeno de retorno elástico provocado pela deformação local dos “drawbeads”.

Os problemas causados pelo retorno elástico em componentes estampados causam um enorme custo de “não qualidade” devido à imprecisão geométrica destes que, mais tarde no processo, deverão ser evitados, recuperados ou compensados.

No atual estágio de desenvolvimento dos programas de estampagem, logo será possível utilizar-se de uma função sensível ao cálculo direto do retorno elástico integrado na simulação de estampagem. Então, será possível calcular e prever retornos elásticos, e rapidamente provar novas geometrias locais, de forma a eliminar ou reduzir o fenômeno do retorno elástico. Nas Figuras 5.17 (a) e (b) verificamos a representação gráfica da distribuição demonstrada na Tabela 4 das duas variantes.

A pergunta é por que, mesmo considerando-se o erro local discutido nos parágrafos acima, o modelo com o “drawbead” apresenta um melhor resultado em relação à prática. A resposta pode ser dada baseando-se em três simples critérios de análise. O bloqueio local extremamente alto ao escoamento da chapa possui uma ação sobre todo componente estampado e não apenas local tal como no modelo com os “drawbeads” posicionados. Então, como conclusão, a análise aos três critérios impostos resulta em:

- Redução mínima da espessura da chapa;
- Redução máxima da espessura da chapa;
- Distância máxima dos pontos à curva limite de conformação.

Referente ainda ao planejamento dos processos de estampagem, no caderno de encargos deve-se inserir critérios específicos que possam prever os três pontos acima e avaliar todas as simulações de estampagem em relação a estes critérios. Quanto à prática, conclui-se com esta análise que, entre os modelos apresentados, aqueles com os “*drawbeads*” possuem uma correlação de resultados muito mais precisa. Portanto, para este trabalho, será utilizado nas análises o modelo contemplando a geometria do ferramental com a inclusão de “*drawbeads*”.

Figuras 5.17(a) e (b): Representação gráfica do resultado comparativo entre o escoamento da platina (em relação ao seu perímetro inicial) onde, no modelo (a) verifica-se como geometria uma inserção geométrica local e, no modelo (b), observa-se a presença de “*drawbeads*”.

6 Comparativo com a Prática: Construção de um modelo virtual em confronto com os Resultados Práticos

6.1 Calibração da Simulação

Para o desenvolvimento deste trabalho tomamos como um valor comparativo de referência o escoamento perimétrico da platina (como representado na Figura 6.1). Na sequência deste trabalho, esse valor e seu significado, em termos de resultado final, serão estudados.

Em relação às considerações de confronto entre a prática e as simulações, existe a necessidade de estabelecer uma metodologia simples e eficaz, que seja capaz de expor esta problemática, uma vez que na construção e desenvolvimento de um modelo, o processo “prático” sofre uma simplificação que poderá ser significativa em termos de interpretação dos resultados finais. A utilização de um modelo de “*drawbeads*”, como exemplificado no capítulo anterior, é um bom exemplo disso.

Figura 6.1: Representação do escoamento da platina como um valor de calibração a simulação

Mesmo com a simplificação, a simulação deve garantir resultados que apresentem alto nível de confiabilidade, sendo comparável aos resultados obtidos na prática. De acordo com os estudos realizados para o desenvolvimento deste trabalho e demonstrados nos capítulos anteriores, um valor que representa bem essa problemática, e que tomaremos como um ponto de partida para avaliar esta condição, será o escoamento do bordo da platina (Figura 6.1). O escoamento do bordo de platina pode ser simplesmente simulado com qualquer software de estampagem comercialmente disponível no mercado e de relativa facilidade de medição “prática”, ou seja, no

componente físico estampado. Se, em termos de simulação, os resultados estiverem dentro da zona laranja, tal como o resultado obtido com a estampagem da peça “prática” (Figura 6.1), pode concluir que a mesma quantidade de material escoou para produzir a “forma” geométrica da peça (representada pela zona cinza). A medição do escoamento da platina deve ser feita em zonas onde possam ser efetuadas comparações práticas entre simulação e repuxo [31].

Se o escoamento medido entre prática e simulação for muito próximo, as tensões distribuídas na peça serão então muito similares para ambos os processos. Com esse estado de tensões, é possível estabelecer uma comparação das distribuições de espessuras entre o modelo e a prática. Aplicando-se sistematicamente este método, podemos estabelecer um critério de calibragem bastante eficaz para as simulações.

Se a diferença entre a simulação e a prática for muito grande, então será preciso intervir diretamente no sistema das simulações. Parâmetros devem ser verificados e, se necessário, devem ser alterados, de forma a convergir com o escoamento da platina, tal como ocorre na prática. A alteração de qualquer parâmetro deve ser efetuada de forma simples, de modo que possa ser revertida facilmente e efetuada independentemente da condição de programa utilizado. Como indicação e experiência prática, uma primeira verificação deve ser efetuada na força do prensa-chapas e na variação da força dos “*drawbeads*” geradas pelo programa. Outro ponto importante a verificar, que também já se sabe da prática, é que por várias vezes a posição real da platina em relação àquela modelada na simulação é diferente, ou seja, o ponto de partida é diferente um do outro, fator que poderá levar a distorções nos resultados. Isto significa que talvez seja necessário um deslocamento da platina, de forma a “calibrar” as simulações em relação à prática. Nas simulações realizadas pelas principais casas automobilísticas de hoje que emprega a tecnologia das simulações, essa diferença de escoamento encontrada na borda das platinas, em relação às simulações, pode chegar até a $\pm 5,0[\text{mm}]$ de diferença entre um e outro [31], e pode ser representada como uma tolerância ao escoamento da platina. Essa grande banda de tolerância ocorre, entre outras causas, principalmente devido à utilização de determinados modelos de “*drawbeads*” não compatíveis com aqueles utilizados na prática. Quando são utilizados “*drawbeads*” padronizados (Figura 5.14b), devido à redução de espessura local, a média, segundo [31] passa a $3,5[\text{mm}]$. Como $3,5[\text{mm}]$ encontram-se ao interno da tolerância especificada pelas

OEM's de $\pm 5,0[\text{mm}]$, então não há necessidade de qualquer consideração específica ao modelo. A partir desta tolerância, o escoamento da platina pode ser comparado diretamente aos valores obtidos na prática.

6.2 Avaliação e Comparação entre Valores

A avaliação dos valores de redução de espessura das chapas representa o verdadeiro confronto com a prática. Para que seja possível conduzir esta verificação, deve-se marcar na peça uma linha de pontos de medição baseando-se em alguns critérios a definir. Pontos de medição na zona de “drawbeads” portam como já visto neste trabalho, uma discrepância de dados e, portanto, não devem ser tomados em consideração. A linha a ser medida deve ser uma representação exata do comportamento do componente, tomando-se o cuidado de analisar o local de pontos, como raios ou rebaixos, que também são importantes para a análise da peça estampada.

Para suportar a análise e comparação direta dos valores, será utilizado o método desenvolvido pela AUDI AG e empregado com sucesso em [31]. Esta técnica utiliza como valor de comparação os resultados entre a simulação e os valores reais encontrados na peça estampada. O cálculo da redução de espessura $[REP]$ será realizado a partir da comparação relativa da redução de espessura real REP_{real} com a redução de espessura encontrada na simulação $REP_{simul.}$ em termos de valores absolutos. Para este cálculo, seguindo o critério experimental AUDI entre REP_{real} e a $REP_{simul.}$, pode haver um erro relativo segundo o algoritmo:

$$ABS(REP_{simul.} - REP_{real}) \leq 2 \quad [6.1]$$

Se o valor absoluto (ABS) de ambos for menor que dois, então ao erro relativo será atribuído 0%. Obteremos, então, as seguintes expressões:

a) Quando $REP_{real} < REP_{simul.}$

$$ABS\left(\frac{(REP_{simul.} - (REP_{real} + 2))}{(REP_{real} + 2)} \cdot 100\%\right) \quad [6.2]$$

b) Quando $REP_{real} > REP_{simul.}$

$$ABS\left(\frac{(REP_{simul.} - (REP_{real} - 2))}{(REP_{real} - 2)} \cdot 100\%\right) \quad [6.3]$$

Para o elemento representado na Figura 6.2, onde já se verifica a proposta dada de pontos de medição, os pontos em negrito mostram locais onde se encontram valores de máxima. Nestas zonas de máxima, a peça real pode apresentar certa discrepância de posicionamento em relação à peça simulada [32] e [33].

Os resultados da simulação feita em INDEED e em AUTOFORM, são comparados com a peça “prática”. Para obter uma melhor visualização da qualidade dos resultados encontrados, os mesmos foram marcados em cores. Essa visualização baseia-se nas relativas cores dos erros encontrados no cálculo. Se o erro relativo não superar 10%, então este será marcado com a cor verde. Se o erro relativo encontrar-se entre 10% a 20%, então sua cor será amarela. Se o erro relativo superar os 20%, então será marcado com a cor vermelha [34] e [35].

Figura 6.2: Representação de pontos na superfície da peça

A análise de um determinado componente com um critério de erro relativo na verificação e interpretação dos resultados pode levar, durante o processo de comparação com a prática, a um engano de interpretação por parte do usuário. A problemática é a seguinte: partindo-se das fórmulas de erro relativo (equações 6.1, 6.2 e 6.3), executa-se um cálculo para uma redução de espessura superior a 2%. Para pequenas reduções de espessuras, a diferença também é pequena, tendo como resultado um alto valor de erro relativo, embora o erro absoluto possa ser totalmente desconsiderado (Tabela 5, ponto 2). Com isso, o alto erro relativo vem dado como crítico (resultado em vermelho). Ao contrário, para grandes reduções de espessuras, o erro relativo vem dado com moderação. Embora apresente uma alta diferença de erro absoluto de 7% (ponto 4 da Tabela 5), o erro relativo é considerado mediano. Seguramente, para uma diferença tão expressiva, em termos de redução de espessuras, o resultado analisado deveria ser muito mais tendencialmente classificado como crítico, porque este ponto é o mais crítico, encontrando-se exatamente entre uma classificação de “peça boa” e falha na curva CLC [35],[36] e [37]. Os parâmetros tecnológicos da simulação são praticamente os mesmos utilizados na prática. Tais parâmetros foram inseridos de acordo com o plano de Métodos estabelecido para o componente.

Os resultados do programa INDEED[®] representados na Tabela 6 demonstram claramente uma melhor precisão para o material H340X (Apêndice 2) em relação aos dados calculados em AUTOFORM[®], fato causado, provavelmente, pela melhor adaptação ao modelo de escoamento presente no INDEED[®] para os parâmetros deste material.

Mas, além desta análise vem outra problemática, que faz com que os valores da comparação com a prática variem. Durante a fase de tryout do ferramental, algumas regiões do ferramental apresentam uma distância entre matriz e punção muito menores do que outras, às vezes com diferenças na casa de décimos entre uma e outra zona. Para o prensa-chapas ao invés, este retém blocada 100% da peça, tal como no modelo de simulação. O processo de digitalização do ferramental ajuda a conter essas variações de espessura, sendo relevadas na superfície da matriz e do punção. Posteriormente, esses dados serão utilizados na atualização do modelo matemático (CAD/CAE).

Tabela 5 - Exemplo de avaliação, cálculo e análise de erro relativo [%]

	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4
REP real [%]	3,00	3,60	30,00	32,00
REPsimulação [%]	0,95	1,20	27,00	25,00
Erro Absoluto	2,05	2,40	3,00	7,00
Erro Relativo [%]	5	25	4	17

Traversa Teto				
	LadoA	LadoB	LadoC	LadoD
Peça Real [mm]	20	17	6	3
INDEED®	15	19	7	3

Parâmetros:

Força nos “Drawbeads”: 200 [N/mm]
 Força no Prensa-Chapas: 80 [t]
 Atrito: 0,12
 Espessura chapa: 1,00 [mm]
 Material: H340X

Traversa Teto				
	LadoA	LadoB	LadoC	LadoD
Peça Real [mm]	20	17	6	3
AUTOFORM®	19	19	5	5

Parâmetros:

Fator de Força nos “Drawbeads”: 0,25
 Força no Prensa-Chapas: 60 [t]
 Atrito: 0,15
 Espessura chapa: 1,00 [mm]
 Material: H340X

Figura 6.3: Resultado Simulação com INDEED® para a componente obtido no estágio de calibração.

Figura 6.4: Resultado Simulação com AUTOFORM® para a componente obtido no estágio de calibração.

Tabela 6 - Representação REP dos valores de AUTOFORM® e INDEED® para a travessa do teto com o material H340X

Traversa Teto																
Ponto	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
REP _{real} [%]	2,0	5,0	5,0	3,0	16,9	5,9	7,9	6,9	3,0	3,0	0,0	1,0	1,0	6,9	9,9	5,0
REP _{AUTOFORM} [%]	5,0	6,0	7,0	3,0	11,0	4,0	6,0	7,0	6,0	4,0	1,0	3,0	4,0	8,0	7,0	5,0
REP _{INDEED} [%]	2,2	5,5	6,2	3,5	14,2	6,7	7,0	5,5	1,5	1,5	1,5	2,5	2,0	6,7	6,9	5,5

Traversa Teto																
Ponto	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
REP _{real} [%]	10,9	1,0	2,0	2,0	6,9	0,0	7,9	7,9	1,0	13,9	1,0	7,9	5,9	1,0	5,0	4,0
REP _{AUTOFORM} [%]	10,0	2,0	3,0	4,0	8,0	1,0	5,0	7,0	1,0	11,0	1,0	8,0	6,0	2,0	9,0	4,0
REP _{INDEED} [%]	9,5	1,2	1,5	2,5	4,5	1,5	6,0	6,7	1,2	8,5	1,1	11,5	7,0	2,5	6,7	4,5

Figura 6.5: Resultado Simulação com INDEED® para o componente obtido no estágio de calibração.

Figura 6.6: Resultado Simulação com AUTOFORM® para o componente obtido no estágio de calibração.

Apesar da sensibilidade do programa INDEED[®], considerando o atual estágio tecnológico, a descrição matemática do modelo, via cálculo, não basta para a obtenção de resultados quando confrontados com os resultados da prática, especialmente no caso apresentado. Na aplicação prática deste método, com veremos adiante em outro caso industrial de alta complexidade para o desenvolvimento do método de análise comparativa, será necessária uma ampla verificação de todos os itens críticos do modelo, compreendendo principalmente uma análise profunda da geometria do estampo, de tal modo que não haja erros de interpretação dos resultados, como demonstrado neste trabalho.

As simulações e os resultados foram obtidos seja utilizando-se o programa INDEED[®] ou AUTOFORM[®], representando o estágio de calibração da peça. Desta forma, é possível verificar o resultado no estágio final de conformação do componente, comparando-se com o resultado da redução de espessuras no mesmo.

Apesar das deficiências, de uma forma geral, os programas de simulação são ótimas fontes de informação na redução de espessuras de uma peça, em relação à sua geometria e espessura iniciais, podendo servir de referência para a “prática”, especialmente no que se refere ao uso do INDEED[®], como visto nos dados aqui apresentados.

Outra possibilidade no confronto entre os programas dá-se quanto à descrição dos modelos por estes calculados (membrana/casca), o que pode levar a pequenas divergências computacionais nos cálculos o que, por sua vez, pode ter afetado os resultados apresentados no Capítulo 6 (Figuras 5.3 e 5.4). Como se verifica nessas Figuras, a imprecisão dos modelos recai exatamente na dificuldade ou no modo diverso como cada um interpreta a inserção dos parâmetros. Conclui-se que a redução ou simplificação de um modelo de simulação, em relação aos parâmetros reais necessários, seguramente levará à imprecisão dos resultados finais.

6.3 Análise dos Parâmetros de Simulação

Durante a fase de modelagem do processo ou da própria ferramenta, o usuário deve inserir diversos parâmetros que, de uma forma ou de outra, podem ou não influenciar decisivamente os resultados finais. A partir deste ponto, devemos dividir esses parâmetros em duas famílias distintas: parâmetros tecnológicos e parâmetros de simulação. A diferença entre essas duas famílias de parâmetros reside no fato de que os Parâmetros Tecnológicos existem no processo de conformação real, mas na simulação computacional de alguma forma foram substituídos por outros parâmetros da própria simulação. Os Parâmetros de Simulação, ao contrário, não possuem nenhuma referência com o processo real “prático” e tendem, portanto, a modificar a descrição matemática do modelo [31].

Figura 6.7: Influência nos resultados da simulação através da gestão dos parâmetros

A modificação de ambos os parâmetros seguramente leva a divergências nos resultados finais da simulação. Com a análise dos resultados obtidos via simulação, uma vez que se tenha o conhecimento do processo a 360°, ou seja, da variação dos resultados em função do setup dos dados de entrada, obteremos um resultado mais confiável em relação aos dados apresentados. No futuro, a análise destes dados de input à simulação, em confronto com os dados da “prática”, deverá tornar-se uma constante no departamento de Engenharia de Manufatura de um fabricante automobilístico.

6.3.1 Parâmetros Tecnológicos

Os parâmetros tecnológicos são normalmente definidos quando da elaboração do conceito e das exigências do produto final, principalmente no que se refere à força de retenção ou força do prensa-chapas requerida para a “estampabilidade” de um determinado componente. De acordo com a geometria dos “*drawbeads*” será definida uma força máxima de retenção que deve ser gerada por este. O fator de atrito entre a ferramenta e a platina deve também ser definido durante o desenvolvimento do plano de Métodos. Aqui se torna importante também a descrição e a análise técnica entre os possíveis “coatings” ou material de cobertura destas chapas, principalmente se estas foram “zincadas eletroliticamente” (EG) ou se foram “zincadas a fogo” (IG). Para cada um destes materiais, deve ser prescrito um determinado valor de atrito. (Como exemplos, podemos dizer que para uma chapa zincada é normal utilizar um coeficiente no valor de 0,12 em média, enquanto que para chapas de alumínio, este valor sobe para 0,15) [31].

6.3.2 Parâmetros da Simulação

A adoção de um critério adaptativo (rezoneamento) pode ser feita pelo usuário. Para a gestão deste processo, o usuário define alguns critérios para que o programa possa criar rezonear e inserir elementos. Esses critérios ou coeficientes contribuem de modo a alterar a quantidade de elementos durante a rotina de execução dos cálculos de análise. Para se puder analisar a quantidade de elementos necessária para o Rezoneamento de uma determinada área, foi feita uma análise da quantidade de elementos que os algoritmos do software INDEED® cria, de modo a estabelecer uma correlação entre número de elementos e a variação destes [31].

Uma das maiores incertezas em modelos de elementos finitos implícitos e explícitos de processos físicos é a própria escolha da densidade de malha, ou seja, o nível de discretização espacial necessária para se alcançar uma precisa e homogênea solução sobre o domínio analisado. Isto se aplica a modelos de elementos finitos lineares, onde uma fina discretização nos modelos é necessária em regiões onde há altos gradientes para variáveis de soluções. Ainda mais, esta técnica pode ser aplicada também a modelos de processos não lineares, onde o domínio do

modelo pode levar a mudanças substanciais de geometria como, por exemplo, na estampagem de chapas ou em simulações de impacto em estruturas construídas a partir de chapas de aço finas.

A própria densidade de discretização é usualmente utilizada baseando-se a experiência do usuário, formada através do frequente uso de certo código particular de elementos finitos e de técnica. Para o usuário não treinado, a escolha de uma correta densidade de malha pode, portanto, não ser óbvia. Em casos onde a localização de altos gradientes de parâmetros de soluções em grandes modelos é imprevisível, a escolha prioritária de níveis de discretização é praticamente impossível, mesmo ao mais experimentado analista.

Portanto, a adaptação automática de um modelo em um processo de simulação não linear, o qual se auto ajusta ou se adapta a níveis de discretização durante a simulação aos níveis locais requeridos torne-se extremamente necessária. Este benefício não somente reside no atendimento de melhores níveis de precisão nos resultados, mas, em particular, resulta em uma alta eficiência de solução, porque o modelo é continuamente mantido em estados de refinamento para constante precisão local.

Simulações numéricas de estampagem utilizando-se finos elementos de casca é particularmente recomendada para a introdução de adaptações automáticas no modelo, baseado no desejo de obter-se sempre soluções com uniformidade e precisão. A razão é que as deformações de chapa e erros associados são bem circunscritos, se comparados naturalmente com impacto de estruturas ou componentes, feitos de chapas de aço finas, onde as regiões e a natureza das deformações são menos conhecidas previamente. O fato é que a cinemática e as deformações de uma chapa de aço estampada são bem determinadas pela geometria e pela ação das ferramentas, o que facilita, em princípio, a seleção e aplicação do critério automático de adaptação. O trabalho de desenvolvimento deste critério iniciou-se com projetos de monografias de conclusão de curso de estudantes de Engenharia, onde primeiramente estudou-se um algoritmo para a fissão do elemento, isto é, para a subdivisão automática de grandes elementos finos de casca de acordo com a precisão local requerida [31].

Em um segundo momento, novos projetos foram desenvolvidos com base na implementação deste algoritmo, estendendo-a para a fusão do elemento, isto é, para o desrefinamento automático de certas regiões que foram refinadas previamente, e para a compatibilidade de fissão e fusão de elementos com os existentes algoritmos de contato. A fusão de elementos (desrefinamento) pode, em particular, ser levada em consideração, mesmo se a cinemática de deformação do elemento de casca ou placa for revertida para muito próxima do estado original não deformado do mesmo, tal como ocorre em certas porções da platina no processo de estampagem, onde a mesma é dobrada e repuxada na borda da matriz, deslizando sobre esta.

Os passos básicos a serem considerados no algoritmo de adaptação automática para malhas em elementos finitos podem ser enumerados como:

1. Selecionar um método para adaptação do modelo;
2. Selecionar um critério para adaptação do modelo;
3. Criar e implementar um algoritmo eficiente para adaptação do modelo;
4. Tornar o algoritmo compatível com as opções existentes do programa;
5. Tornar visual (graficamente) o pós-processamento dos modelos adaptados;
6. Testar a nova metodologia proposta.

Os passos descritos acima, bem como toda a metodologia de adaptação de malha e algoritmos podem ser verificados em [31]. Como o objetivo deste trabalho é estabelecer uma linha de confronto entre teoria e prática, algumas diretrizes quanto ao uso prático dos parâmetros de adaptação de malha foram estabelecidos.

Via de regra, é possível efetuar o refinamento de uma malha partindo de 20 [mm] até chegar a um comprimento de canto de 2,5 [mm]. Ambos os comprimentos de elemento podem ser influenciados pelo usuário, mas é recomendado que, na “prática”, esses valores máximo e mínimo sejam comuns nos cálculos de um determinado fabricante, de modo a haver uma padronização entre todas as simulações e entre todos os usuários dos programas de simulações. Desta forma, tal como apresentado na Figura 6.8, partindo-se da linha externa com

aproximadamente 20 [mm] de comprimento (linha azul), o elemento será proporcionalmente dividido em 10 [mm] (linha verde), 5 [mm] (linha amarela) e 2,5 [mm] (linha azul). A menor aresta possível será definida em 2,5 [mm], não podendo reduzir-se mais do que esse valor (estabelecido pelo usuário).

A influência do rezoneamento ou da adaptação da malha no cálculo pode influenciar o resultado final ou a manipulação deste. É importante que sempre seja definido para todas as simulações um limite máximo do uso deste comando e que seja estabelecido um confronto entre o resultado final e o resultado prático obtido, de modo a estabelecer uma regra no confronto e desenvolvimento do plano de Métodos para os processos de estampagem [31].

Figura 6.8: Divisão do Elemento

6.4 Critérios de Rezoneamento

6.4.1 Critério de Fissão dos Elementos

Através do critério de fissão se efetua um refinamento da malha com referência ao ângulo do elemento. Em outras palavras, quando uma determinada área deve ser rezoneada, o ângulo formado entre elementos vizinhos é verificado, a fim de determinar se o mesmo se encontra dentro de um determinado limite. Os limites deste ângulo ao qual, segundo o critério, o elemento se rezoneia, podem variar. Como valor mínimo de entrada, 15° é um valor razoável. Se o valor encontrado for superior a este ângulo, então o elemento poderá ser dividido, gerando novos elementos, conforme apresentado na Figura 6.9.

Figura 6.9: Ação do critério de fissão, (a) critério de partida, (b) definição de novos elementos.

6.4.2 Critério de Contato Peça-Ferramenta

Muito similar ao critério de fissão, o critério de penetração da ferramenta também fomenta o refinamento da malha. Para decidir se um rezoneamento local é necessário, verifica-se se a platina localmente interfere e penetra na superfície da ferramenta. Esse valor de penetração na superfície da ferramenta também é modificável e pode ser inserido pelo usuário, de acordo com parâmetros estabelecidos. Como um valor normal, se insere no software como um parâmetro mínimo de entrada o valor de 0,5 multiplicado pela espessura da chapa. Esse valor deve manter o mínimo de interferência entre a platina e a superfície da ferramenta. Com a interferência da malha (platina) na superfície da ferramenta, a geometria desta passa a se desenvolver de forma obscura e instável, gerando pequenos raios e certas formas da superfície que não permitirão uma formação correta do modelo. Com isso, localmente haverá uma discrepância entre os dados da prática e os dados da simulação. Se for possível atender ao critério de penetração, então, tal como apresentado na Figura 7-10, haverá um refinamento da malha.

Figura 6.10: Critério de penetração na ferramenta. (a) Limite do critério, se observa a interferência entre platina e a superfície da matriz, (b) definição de novos elementos.

6.4.3 Critério de Fusão dos Elementos

Diferentemente dos dois critérios já apresentados, o terceiro critério, que chamaremos de critério de fusão, tem como finalidade reduzir a quantidade de elementos. Esse critério possui a vantagem de permitir que todo elemento que não serve para definir a geometria, pode ser condensado (ou fundido) em um elemento único, reduzindo, assim, o tempo de execução de cálculo final (*elapsed time* da simulação). A decisão de reduzir a quantidade local de elementos, fundindo-os ou não, é muito similar ao critério de fissão, definido principalmente pelo ângulo formado entre as normais destes elementos. Se o ângulo for tal que, se ambos os elementos unidos não forem maiores que 20 [mm] - critério definido no Capítulo 1, item 1.5.2 - então ambos os elementos poderão ser fundidos, originando um elemento único. Na Figura 6.11 encontra-se representado graficamente este critério.

Figura 6.11: Critério de fusão dos elementos. (a) o ângulo entre as normais é tal que a soma do comprimento dos dois elementos não excede 20[mm], portanto ambos podem fundir-se (b) formando um elemento único.

7 Criação de um Procedimento Metodológico para Comparação Entre Prática e Teoria - Exemplo de aplicação metodológica em um caso industrial

7.1 Conceito

Como descrito no início deste trabalho, todo conhecimento metodológico prático do tryout deve ser colocado em confronto com a metodologia teórica, de forma a um completar sempre o outro. Através da definição de um standard de trabalho ou de uma sequência lógica de atividades para a elaboração de modelos de engenharia reversa é possível realizar simulações de conformação que possam trazer resultados precisos acerca do processo de tryout. Esses resultados, além do uso prático e aplicação no tryout do ferramental construído (reduzindo-se o tempo de tryout e eliminando a sistemática “tentativa e erro”). Posteriormente, estes mesmos resultados devem ser aplicados na construção de novos e futuros estampos, reduzindo-se o tempo e custos das atividades, seja de projeto, construção e futuros tryouts.

O confronto “prática x teoria” se torna importante fonte de conhecimento técnico disponível ao pessoal da Engenharia de Manufatura. Para a definição destes Standards, iniciou-se o trabalho com a criação de um banco de dados e a consequente definição de uma metodologia de trabalho, seja para o uso prático na projeção de novos estampos, seja na redução específica do tempo de tryout destes. Este standard operativo, que será representado por um check-list, pode ser dividido em três fases, tal como ilustrado na Figura 7.1.

Figura 7.1 - Guia de fases para a definição de “processo standard” em confronto com a prática.

Em primeiro plano se verifica a fase denominada “levantamento de dados”, que serão levantados partindo-se do processo de estampagem “prático” e dos dados previamente utilizados para os estudos de viabilidade construtiva dos estampos - simulações do plano de métodos, sendo que, entre outros parâmetros e informações, aqui são verificadas as direções de escoamento, os estiramentos máximos, com a possibilidade de análise através da curva limite de conformação CLC [23] [31] (redução de espessura localizada), a força do prensa-chapas, a força de repuxo, os dados da prensa definida, informação sobre a platina e sobre o tipo de material de recobrimento desta (coatings) onde, por sua vez, define o coeficiente de atrito a ser utilizado posteriormente na simulação [31]. Também os dados da superfície geométrica do estampo nesta fase deverão ser disponibilizados para um confronto direto entre a geometria de tryout do estampo com os dados relativos à primeira simulação baseada em dados matemáticos CAD (matemática inicial). Estes dados matemáticos da superfície do estampo serão obtidos através da digitalização da superfície deste [38] e [39], com a técnica específica, como já descrito no Capítulo seis deste trabalho. Para o modelo de partida, ou seja, o modelo definido como teórico onde todo o plano de métodos foi ou baseado ou verificado quanto à viabilidade técnica, denominaremos modelo **MOD1**.

Ainda na Figura 7.1, em uma segunda fase, observa-se a necessidade de preparação dos dados de *Input*, onde serão inseridas informações importantes para a modelagem do processo e para a parametrização da simulação. É a fase onde se iniciam os loopings entre digitalização, análise (simulação) e aplicação das conclusões analíticas (aplicação dos resultados) no tryout dos estampos eliminando, assim, o tryout do tipo “*tentativa e erro*”. Desta forma, substitui-se uma tentativa (por parte de um ferramenteiro) por um resultado de uma simulação que possa trazer um ganho qualitativo definitivo a este estampo. Será assim sucessivamente em vários loopings, até que o resultado atingido seja considerado plenamente satisfatório. Isto significa que os objetivos de qualidade geométrica e, no caso de componentes externos à carroceria, também deverão ser atingidos. Sem a aplicação do resultado destas simulações, hoje estes tryouts se estendem por inúmeros loopings, caindo na espiral *tentativa-erro*. Aumentam, assim, os custos de intervenção no ferramental, podendo até não atingir os resultados e objetivos esperados.

Na terceira e última parte serão apresentados os resultados desta simulação em confronto com os dados da prática, com a representação de valores, a comparação da redução de espessuras entre “prática e teoria” e também o levantamento das diferenças geométricas entre o modelo de série standard e o modelo do plano de métodos.

Como exemplo da aplicação desta técnica, chamaremos de “*Ferramenta de Engenharia Reversa I*” (**FER1**), representada nas Figuras 7.2/7.4/7.6) ao modelo que utilizaremos para demonstrar o método aqui proposto. O FER1 representa um modelo segundo o esquema definido do plano de métodos em comparação com os dados da prática, obtidos a partir da digitalização da superfície do ferramental. FER1 é o primeiro modelo que podemos considerar real, ou seja, é um modelo que se baseia na superfície matemática verdadeira do estampo na fase de tryout, simulado com os dados que, por sua vez, são obtidos através das escolhas (decisões) do processo denominado real (parâmetros do processo definitivo, como prensa, material, coatings, etc).

7.2 Fluxo de Trabalho e Nomenclatura de Modelos

No diagrama representado na Figura 7.2 podemos verificar todo o fluxo de andamento e procedimentos a serem seguidos para a aplicação desta análise, bem como todos os modelos que aqui serão apresentados e discutidos, com a respectiva análise de cada um destes. Partindo-se do ciclo Processo-Produto em alto e ao centro, o trabalho se dividirá em 3 fases distintas, sendo que a terceira fase pode se estender por “n” sub-ciclos (ou loopings) necessários, até que o resultado final seja atingido. A primeira fase, chamada “preparação e análise”, compreende a análise em simulação de estampabilidade a partir da geometria inicial do componente, ou seja, da proposta de configuração processo-produto com viabilidade produtiva. Uma vez escolhida a proposta inicial, após a verificação de diversos ciclos de simulações, a este modelo capaz de atender às especificações de projeto, daremos o nome de **MOD1** (coluna direita do diagrama, “Simulações MEF”) ou modelo 1. Esse MOD1 representa as características iniciais de projeto ou características de partida para o trabalho de análise, que a este ponto é ainda puramente virtual (Base dados matemáticos CAD).

Figura 7.2- Diagrama de fluxo de atividades “Engenharia Reversa”

Na coluna direita, onde se lê *Meisterbock* (ver Apêndice B), este meio auxiliar de análise será utilizado para posicionar o componente, tal como em posição de uso no veículo, a fim de simular a condição real deste componente (inclusive a ação da gravidade e influência de “*matching*” físico com outras peças). *Meisterbocks* são instrumentos de alta precisão geométrica e que devem ser utilizados e operados por pessoal altamente qualificado com conhecimento metrológico profundo. Servirá principalmente para tal, como descrito no diagrama de fluxo, na análise do retorno elástico geométrico dimensional deste (ou seja, simula como o cliente final vê a geometria da carroceria ou do veículo sobre rodas) para fins de comparação com o resultado obtido pela simulação de estampagem. Também em termos de comparação com as espessuras calculadas, será utilizado um aparelho de ultrassom na medição das espessuras da peça estampada física, para comparação com os modelos calculados. Uma vez construído o ferramental, feito o primeiro tryout deste, retirado uma série de componentes físicos, deve-se, então, analisar a peça física no *Meisterbock*, que chamaremos de **FER2** (Ferramenta de Engenharia Reversa 2), que é a representação dos dados da superfície da peça de forma metrológica. O FER2 representa a verdadeira grandeza dimensional da peça estampada.

Logicamente, o primeiro passo importante na elaboração do trabalho é a digitalização da superfície do ferramental após o primeiro tryout (segundo a técnica apresentada no Capítulo 6) que chamamos de modelo Ferramenta de Engenharia Reversa 1 ou FER1. Esse modelo, que é a caracterização da superfície do ferramental após a intervenção “prática”, e já deve apresentar diferenças geométricas significativas em relação à superfície CAD matemática (modelo **CAD1**), tal como desenvolvida pela engenharia do produto. Portanto, se a este ponto temos diferenças entre as geometrias, será justo dizer que poderemos também ter diferenças entre os resultados de uma simulação de estampabilidade a partir dos dados de origem (**MOD1**) e dados de simulação, de acordo com o modelo da superfície digitalizada da ferramenta (**FER1**). Esta será a missão principal desta atividade, cruzando-se estes dados, juntamente com a análise prática da peça física, que tornará possível estipular em qual direção devemos caminhar para obter resultados satisfatórios, em termos de qualidade, para o componente em questão, com atividades de tryout voltadas à resolução de problemas, e não mais em termos de atividades do tipo “tentativa e erro”, ou seja, intervenções cegas no ferramental que, além de desperdício de tempo, gera atrasos na obtenção de resultados, representando ainda um ônus financeiro inigualável para a empresa.

Hoje, a prática mais comum de mercado é aquela onde do momento que se inicia a construção do ferramental (e primeiro tryout), a área de Qualidade Assegurada (Metrologia e Auditoria de Superfícies) passa juntamente com a ferramentaria (construção estampo), utilizando-se da técnica “tentativa e erro” a prosseguir com desenvolvimento e avanço dos componentes de geometria complexa, até que estes possam alcançar um nível de qualidade aceitável para o cliente. O problema é que, para se obter por muitas vezes o nível qualitativo adequado, podem se passar diversos meses de intervenção técnica no ferramental e, por muitas vezes, não atingindo os resultados esperados. O impacto financeiro (principalmente os custos de mão-de-obra especializada e máquinas) também pode ser devastador, sem contar os possíveis retardos no programa de lançamento de um determinado veículo ou até a possibilidade de ter que se retrabalhar a peça (custos de não qualidade), causando, assim, um ônus financeiro enorme para a empresa.

Por esse motivo, como primeiro passo, uma vez que se tenha analisado e confrontado os dados do modelo matemático proposto para o componente (com a geometria descrita no modelo denominado CAD), o modelo da superfície do ferramental CAD1 e, respectivamente, a simulação e análise dimensional deste (FER1, FER2), pode-se então passar a pensar em uma fase 2, ou seja, ao invés de partir-se para uma sistemática de tentativa e erro, parte-se logo para um ciclo de análise, simulações baseadas da “nova” condição da superfície do ferramental (após intervenção por parte dos ferramenteiros e considerado as ações de tryout implementadas), concebida com o uso da fotogrametria e análise dimensional do componente gerado por essa geometria de ferramental, que aqui chamaremos de Fase 2, ou primeiro ciclo de análise real; parte-se de uma condição denominada “real”, podendo-se então chegar ao ponto final a “n” análises realizadas, atingindo os objetivos dimensionais e de qualidade superficial (para painéis externos à carroceira) do componente. Estes “n” ciclos devem ser definidos conforme a necessidade. Porém, esta técnica apresentada em confronto com a sistemática de “tentativa e erro” aqui, pode representar uma redução de tempo de tryout de até 30% para alguns componentes, como será demonstrado posteriormente nas conclusões deste trabalho.

Em resumo, uma vez analisados os resultados da fase 1 (também chamada condição de partida, ou seja a condição inicial prevista do plano de métodos), parte-se para uma verificação da nova condição deste ferramental após o primeiro tryout, iniciando-se a fase 2. Nesta fase, o objetivo principal é, tomando-se como base os dados analisados na fase precedente, criar um modelo que, uma vez calibrado (ver capítulos 5 e 6), possa ser verificado, em termos de viabilidade e apresentação dos resultados (com base nos critérios escolhidos, como redução de espessuras e retorno elástico das zonas geométricas críticas do componente), de modo que o mesmo possa ser atualizado (através da digitalização da superfície da matriz), de forma a poder convergir os dados da simulação o máximo possível, segundo a realidade física encontrada na “prática”. Isto permite provar e analisar possíveis modificações na geometria do ferramental (tryout virtual), os quais podem ser considerados resultados hipotéticos para a fase seguinte, reduzindo-se o erro na fase de tryout sucessiva. Ou seja, a variável “tentativa e erro” são eliminados do sistema. Desta forma, o ferramenteiro passa a executar uma intervenção com probabilidade de sucesso muito maior (visto que a simulação torna possível ter um resultado virtual) do que se fosse feita uma intervenção “cega”, a partir de dados que não representam a realidade da ferramenta.

Então, a cada fase sucessiva (**Faseⁿ**) um novo modelo matemático (**CADⁿ**) será proposto, os dados matemáticos do CAD serão modificados e, assim, como no fluxo apresentado na Figura 7.2 (Fase 2), dando origem a um modelo que chamaremos de **CAD2**, que tem como base os dados da superfície digitalizada na fase antecedente. Se o resultado desta simulação for positivo, o passo sucessivo será modificar o ferramental com a geometria desta simulação (**MOD2**), passando-se, assim, à intervenção geométrica que, no fluxo chamaremos de **1a.intervenção geométrica no ferramental** (ou seja, intervenção técnica (tryout) baseada em dados provenientes de um modelo matemático atualizado segundo a nova superfície do ferramental). Então, a peça física que sucessivamente será criada (primeiro lote de produção pós tryout), passará pela análise física geométrica dimensional no *Meisterbock* (**FER4**) para verificação dos resultados dimensionais e aprovação do componente. Essa fase é muito importante, pois é neste momento que se verifica e se confirma o êxito do tryout físico do ferramental, segundo a geometria do componente e seu impacto dimensional na construção da carroceria automotiva. A superfície do ferramental, após a modificação, será ressimulada quanto à estampabilidade (**FER3**), e assim sucessivamente, a análise dos resultados, se estes ainda apresentarem a necessidade de

intervenção (ou intervenções) sucessiva(s). Então, a geometria de partida para o próximo passo deve ser aquela que represente (descreva) a última superfície do ferramental, de forma a simulação poder convergir os resultados de forma mais próxima da realidade possível. Esse ciclo de verificação-digitalização pode ser repetido por “*n*” vezes, até que, quantitativamente, o componente se encontre dentro das tolerâncias dimensionais requeridas, com a aprovação final da área da qualidade assegurada.

Podem ser criados então modelos como **FER’n** e **CAD’n** para descrever fases de tryout sucessivas. Assim, desta forma se cria um procedimento automático de um “ciclo” de verificação, até que sejam atingidos os objetivos. Por exemplo, um lateral estampado hoje representa o mais difícil de todos os componentes estampados para se chegar à dimensão e estética comuns requisitadas pela qualidade e descritas nos cadernos de encargos de processo e produto. Sem o uso desta sistemática, a experiência prática acumulada nos últimos anos por algumas OEM’s demonstra que são necessários de 12 a 15 meses de trabalho e uma média de 10 intervenções técnicas para que seja atingida a sua maturidade dimensional. Com o uso da técnica proposta, esse tempo se reduz para cerca de 8 meses para laterais de modelos 4 portas e cerca de 6 meses para laterais modelos 2 portas, reduzindo-se o número de intervenções em aproximadamente 50%.

7.3 Comparação da teoria com a prática utilizando como exemplo o modelo “Ferramenta de Engenharia Reversa FER1”

7.3.1 Fase 1: Preparação e Análise dos dados “Simulação e Modelo FER1”

Na Figura 7.3 abaixo apresentamos um modelo lado esquerdo de um certo veículo, denominado **CAD1** na figura 8-2. A metodologia aqui empregada foi utilizada para as laterais de ambos os lados, mas, para efeito de representação neste trabalho, demonstraremos somente o resultado referente ao lado esquerdo do veículo.

Figura 7.3 - Representação em CAD (Modelo **CAD1**) da lateral esquerda de um veículo.

O modelo simplificado do estampo desta lateral modelado em elementos finitos para a simulação é representado na Figura 7.3 e a esse modelo chamaremos de FER1 (ou seja, com a sua geometria construída a partir dos dados geométricos da superfície do estampo digitalizado) Neste modelo é possível distinguir duas áreas de modelagem importantes, uma externa de cor marrom, que define a superfície de prensa-chapas (Figura 7.4), e outra verde, que corresponde à geometria final do produto. Painéis laterais automotivos estampados representam o nível mais alto de dificuldade, em termos de processo de estampagem aplicado na indústria automobilística, tal como representado na secção A-A da Figura 7.4.

Para a produção deste componente, o material utilizado foi o DX56D com espessura de 0,7 [mm]. Todas as informações referentes ao material utilizado encontram-se disponíveis no Apêndice A, tanto os dados correspondentes à biblioteca de programa que utiliza o software, bem como os resultados de análise mecânica do laboratório de materiais executados a partir de amostras do coil de fornecimento normal (fornecedor ARCELOR). Para as simulações foram inseridas as informações obtidas no certificado do fornecedor (propriedades mecânicas específicas da bobina de origem).

Figura 7.4: Representação do modelo do ferramental de estampagem do lateral em AUTOFORM. Se evidência a secção A-A demonstrando a profundidade de embutidura deste componente, que assim o rende um dos mais complexos e difíceis de estampar de todo o veículo. Esse modelo será denominado (**FER1**).

Como já discutido no tópico anterior, ao início de todo o processo, assume-se o fato de que existe uma simulação de partida onde todo o plano de métodos e as variáveis de construção deste estampo foram previamente testados, (MOD1), (na Figura 7.5 verifica-se a análise das profundidades de repuxo), tal como representado na fase 1 do diagrama da Fig. 7.2 [31], ou seja, já se parte do pressuposto de que o ferramental foi construído a partir de uma primeira simulação feita (MOD1) que verifica do plano de métodos proposto para os estampos da lateral (principalmente a operação 20, ou seja a primeira operação de repuxo, Figura 7.10).

A esse modelo dá-se o nome de representação puramente virtual, modelo apenas construído para a verificação do plano de métodos e da viabilidade construtiva deste estampo, ou seja, a geometria inicial de partida na preparação e análise ao tryout. Para maiores detalhes sobre a preparação deste plano de métodos e sobre a simulação inicial de um componente ver a referência [31]. Normalmente, esse modelo, de natureza simples (muitas vezes construído com matemática CAD do produto ainda provisório, não definitivo (liberado antecipadamente por motivos de *timing* do projeto (engenharia simultânea), de forma que se possam antecipar estudos avançados sobre estampabilidade de certos componentes, considerados críticos em relação ao *timing* total do programa), com diversos erros construtivos e de representação geométrica da superfície incompleta ou provisória, tal como já discutido nos Capítulos anteriores).

Com esse modelo é possível verificar principalmente o plano de balanço do estampo, escoamento material dentro da ferramenta e fechamento do prensa-chapas, dimensionamento do número de operações e probabilidade de rompimento do material (análise da curva CLC) [31]. Como já explicado anteriormente, este primeiro modelo de análise é um modelo relativamente simples, e infelizmente, muitas vezes se constroem estampos de alto custo e complexidade técnica baseando-se somente nestas simulações. O resultado é, por consequência, altos custos de modificações técnicas posteriores e aumento considerável no tempo de tryout, sem contar o não atingimento dos objetivos de qualidade. Como já descrito no tópico anterior, a escolha deste componente (lateral externa) foi baseada segundo a dificuldade técnica de construção e tryout, tanto no projeto e construção do estampo, bem como na dificuldade de realizar tryout e/ou de chegar à condição dimensional requerida construtivamente para a armação da carroceria deste modelo.

Ainda para esta simulação, podemos confrontar com um componente com alta profundidade de embutimento, como evidenciado no corte B-B da Figura 7.4 de 206 [mm] e na representação da simulação de repuxo (análise da profundidade de repuxo) da Figura 7.5, o que o caracteriza como um dos componentes de máxima extrema condição de estampabilidade dentro do ramo automobilístico (estampagem extra-profunda).

Figura 7.5 - Representação do modelo (**MOD1**) da simulação de repuxos. Em evidência a zona de repuxo crítica, zona da caixa de roda posterior. Na escala a representação em cores da profundidade de repuxo.

Outro problema geral deste tipo de componente é a estética geral dos raios. Esses raios se não forem bem conformados ou definidos, ou com uma mínima variação geométrica principalmente na zona dos vãos, evidencia um erro porque não se consegue posicionar a porta neste vão, seja em termos de folga, seja em termos de faceamento da porta com a lateral a vice versa. Uma mínima variação geométrica que impeça de posicionar bem a porta neste vão é percebida imediatamente pelo cliente como uma variação de qualidade do produto. Também gera retrabalhos pesados na tentativa do reposicionamento da porta no vão, o que, por muitas vezes, demonstra ser inútil devido à impossibilidade de se recuperar o vão com qualquer tipo de retrabalho. Por isso, a análise prévia de estampabilidade dos raios é extremamente necessária.

A esses dados e a este modelo de partida, chamaremos de MOD1. Ele deve se tornar no futuro um modelo mais desenvolvido, pois, à medida que o conhecimento evolui, os engenheiros de simulações computacionais aplicadas e engenheiros do plano de fabricação (estampagem) conseguem aplicar todo o know-how e conhecimentos adquiridos com as simulações e com o tryout de vários estampos construídos. O MOD1 não será detalhado neste trabalho. Parte-se do pressuposto de que o trabalho de análise do plano de métodos tenha sido analisado e aprovado. O objetivo será agora o de encurtar o tempo de tryout deste ferramental, através da aplicação da técnica de engenharia reversa. Mais informações sobre a construção de modelos para desenvolvimento de estampos verificar em [31].

Desta forma, ao modelo denominado FER1 (modelo construído a partir dos dados da superfície digitalizada do estampo, ou seja, superfície real fresada a partir dos dados matemáticos com os dados reais do processo, tal como características do material e da prensa utilizados em produção), adicionamos também o estudo geral das formas dos raios da peça. Raios bem definidos representam uma percepção acurada da qualidade percebida pelo cliente. Principalmente nas zonas críticas que demonstraremos adiante, os raios em uma lateral são elementos importante de definição de folgas e faceamento das partes móveis (portas e tampas) com os elementos geométricos da lateral definem a Qualidade percebida.

Na Figura 7.6, verifica-se o estudo dos raios estéticos do painel lateral feitos para o modelo FER1. Verificam-se, a partir da representação das cores vermelho e azul, os raios de maior impacto estilístico, que trazem harmonia ao conjunto estilístico do veículo. Ainda na Figura 7.6 é possível visualizar no modelo proposto o ponto mais crítico de conformação e definição dos raios.

Figura 7.6 - Representação do modelo de análise de conformação dos raios para FER1. Representados em cores laranja e azul os raios de definição estilística do componente.

Nas Figuras 7.7 (a)-(b) e Figura 7.8, evidenciam-se as zonas onde, provavelmente, se concentrará todo o trabalho de tryouts sucessivos. Também se tornam evidentes os aspectos críticos da estampabilidade dos raios externos e internos correlatos a esta área. Com o desenvolvimento das simulações, ficará claramente demonstrado que o problema de direção de escoamento em certas regiões pode dificultar a conformação de áreas de impacto estilístico.

Figura 7.7 (a) (b): Detalhe da análise de conformabilidade dos raios da lateral (detalhe FER1) evidenciados na cor laranja. No detalhe, os raios mais críticos de impacto estilístico. Nesta zona, devido à condição estilística, o ajuste entre porta e laterais se torna difícil, devido à questão estética.

Figura 7.8: Representação das zonas críticas da lateral, modelo FER1. Representadas em vermelho e em verde estão as áreas potencialmente mais críticas, em termos de tryout para este componente, com os respectivos pontos críticos de análise.

O problema que normalmente se relaciona com a questão do tryout, envolve a mudança de planos de escoamento (acrescenta-se normalmente solda em certas zonas para executar-se alterações geométricas na superfície do estampo); estes elementos podem sofrer uma falta de homogeneidade, causando desde pequenas deformações na superfície da peça nas zonas adjacentes aos raios destes.

Intervenções corretivas em raios são totalmente executadas de forma manual por ferramenteiros, sendo o polimento final da superfície do estampo feito totalmente à mão. Deste modo, na Figura 7.8 podemos ter uma ideia geral da geometria do modelo FER1 em dados CAD, onde em cores verde e vermelho evidenciam as zonas críticas.

Ao longo da demonstração da técnica de engenharia reversa e da potencialização de redução no tempo de tryout, nos concentraremos nas áreas evidenciadas. Outros pontos de análise foram considerados, mas não se destacam como causa maior dos problemas relativos ao tryout. Para posterior análise focada nos dados computacionais, bem como nos dados que sucessivamente serão obtidos, numeraram-se as zonas críticas, de forma a organizar os dados para uma futura comparação dos valores locais entre modelos. A Figura 7.8 representa os 16 pontos tomados como referência para a execução das análises deste trabalho. Os pontos foram escolhidos e numerados nesta zona porque representam uma das partes mais difíceis em termos de tryout ou de construção própria de uma lateral automotiva.

Para o modelo FER1, os valores de pré-cálculo utilizados para o primeiro tryout em prensa foram para o prensa-chapas externo (ver Figura 7.4), em torno de $1,4 \times 10^6$ [N] e para o prensa chapas interno (vão do vidro interno), em torno de $3,0 \times 10^5$ [N]. O blank possui espessura 0,7 constante de dimensões 1635 x 2850 [mm]. A massa final do componente é de 12,40 [kg], com um aproveitamento da área total deste blank de 48,6% aproximadamente (perda elevada devido aos vãos vidros e porta).

Figura 7.9 - Representação da operação OP20 de repuxo da lateral, onde se evidenciam a distribuição e posicionamento dos drawbeads.

Na Figura 7.5 verificamos a representação da operação de repuxo da lateral, onde se evidencia a distribuição dos “drawbeads” na superfície da ferramenta, bem como o escoamento da platina nos bordos, o que será objeto de análise posterior mais detalhada e como já colocada neste trabalho anteriormente, será uma referência importante para o confronto da simulação com a prática.

Na Figura 7.10 podemos verificar a fotografia da lateral apenas estampada, conforme a representação da operação 20 na Figura 7.9. A construção do estampo foi finalizada e os primeiros tryouts reais práticos para a conformação da peça foram iniciados. No processo não se utilizou nenhum outro meio lubrificante que não o zinco (depositado a fogo, espessura 7 [μm]) na superfície da platina. Foram constatados nos experimentos iniciais alguns pontos de ruptura na superfície da peça que, posteriormente, na análise dos dados serão anotados e discutidos. Visando obter uma primeira peça com um nível de qualidade aceitável, os ferramenteiros seguiram a prática, aliviando diversas regiões de raios e modificando a altura de alguns “drawbeads”, de forma a permitir que a chapa pudesse escoar com mais facilidade. É neste ponto que começamos a visualizar as primeiras divergências entre a “prática” e a “teoria” das simulações. Quando foi

iniciado o projeto deste estampo, seguiu-se uma matemática inicial “teórica” da superfície da peça, que posteriormente, foi utilizada para a construção do estampo. Essa matemática sofreu, obviamente, diversas modificações até chegar na forma atual do estampo, mesmo porque passou por algumas simulações, até chegar na geometria atual em que se apresenta o estampo.

Figura 7.10 - Blank repuxado da operação OP20.

O problema é que ainda temos muitas divergências entre o produto que sai do estampo em relação ao resultado apresentado na simulação. Isto significa muitas horas de retrabalho de peças e muitas horas de intervenção no estampo, até que sejam obtidas peças com certo nível de qualidade, seja superficial, seja dimensional. **Normalmente, o trabalho das simulações termina exatamente neste ponto e, daqui para frente, o trabalho de tryout é conduzido totalmente de forma manual, ou seja, seguindo a tradicional metodologia da “tentativa e erro”.** É exatamente este o objetivo deste trabalho: mudar essa metodologia. Por fim, após várias intervenções “práticas” na ferramenta, uma primeira peça sem sinais de ruptura vem estampada. Essa peça será dimensionada e digitalizada (FER2), assim como também será a superfície da ferramenta FER1. São esses dados que servirão como ponto de partida para o desenvolvimento do que chamaremos de “tryout virtual”. Os dados geométricos desta primeira peça serão discutidos em um tópico específico adiante.

7.3.2 Calibração e Análise do Modelo FER1

O próximo passo é calibrar o modelo FER1 (teórico) com a prática (peça estampada), ou seja, confrontar os dados da simulação do modelo construído com a superfície real digitalizada e usando os dados reais de processo em confronto com os resultados obtidos. Para tal, utilizaremos os dois critérios propostos nos Capítulos 6 e 7 deste trabalho, baseando-se na distribuição de espessuras e no escoamento da platina (e confrontando posteriormente os resultados dimensionais do componente quanto ao retorno elástico dos raios).

Modelo FER1	Lado A	Lado B	Lado C	Lado D	Lado E	Lado F
Peça Real [mm]	22	62	88	44	58	76
Simulação [mm]	21	55	79	47	52	62

Tabela 7: Resultado comparativo entre o escoamento da platina (em relação ao seu perímetro inicial) entre a peça real (operação 20) e a simulação (com inserção local de “drawbeads” tipo “meia-cana”) para o modelo FER1.

Foi realizado o controle do escoamento teórico em altura (direção “z”, ver referência de direção na Figura 7.8) do blank, a partir do bordo até o ponto de escoamento dos drawbeads (que, neste caso, são do tipo “meia cana”, ver Figura 5.14 (b), cujos valores estão na Tabela 7).

Tabela 8(a)

Redução de espessuras [REP] [%]– Modelo MOD1 (Condição inicial) e Componente

Pontos	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16
REP _{Real}	13,2	13,8	27,8	20,2	18,2	8,2	8,1	26,2	19,1	28,2	21,2	15,7	13,0	34,2	12,1	30,1
REP _{AUTOFORM}	16,2	15,2	29,9	28,9	24,8	12,1	13,1	27,5	24,2	25,1	32,8	19,1	17,3	54,4	10,1	34,1
Erro Relativo	6,6	3,8	0,3	30,2	22,8	18,6	29,7	2,5	14,7	4,2	41,4	7,9	15,3	50,3	0,0	6,2

Tabela 8(b)

Redução de espessuras [REP] [%]– Modelo FER1 e Componente

Pontos	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16
REP _{Real}	13,2	13,8	27,8	20,2	18,2	8,2	8,1	26,2	19,1	28,2	21,2	15,7	13,0	34,2	12,1	30,1
REP _{AUTOFORM}	14,9	15,9	31,2	22,7	24,1	11,1	11,5	24,9	20,3	22,2	27,8	12,4	15,3	44,6	11,1	28,1
Erro Relativo	2,0	0,6	4,7	2,3	19,3	8,8	13,9	2,9	3,8	15,3	19,8	9,5	2,0	23,2	9,9	0,0

Tabela 8(a) e (b): Análise da distribuição de espessuras (em valores percentuais) na peça real do 1.tryout da lateral comparados ao modelo de condição inicial denominado MOD1 e a simulação realizada para o modelo FER1. Na figura foram evidenciadas e numeradas as zonas críticas de interesse para a análise deste trabalho.

Para poder obter uma referência de partida para efeito de comparação com os dados do modelo FER1, nas Tabelas 8(a) e 8(b) representamos os valores que foram obtidos na primeira simulação feita para validação do plano de métodos ou denominada MOD1 e os valores para a redução de espessuras na simulação FER1 respectivamente.

A distribuição de espessuras na peça real de 1 tryout nas zonas de interesse da Figura 7.8 foram realizadas utilizando-se um aparelho de medição por ultrassom, e os valores [%] encontram-se representados na Tabela 8 nas linhas (REP_{Real}) para efeito comparativo com os modelos MOD1 e FER1.

Toda a zona apresentada em escala de vermelho na Figura ilustrativa da tabela 8 demonstra os problemas de tryout (pontos 2,3,7,8,9,11,13,14) apresentando-se nas primeiras peças estampadas com sérias deformações e rugas distribuídas em vários pontos, principalmente na passagem de raios e superfícies, com alteração de direção (alisamento do modelo em clay (argila) original do estilo do veículo). Utilizando-se o critério apresentado e discutido no capítulo 7 e também em [31], calculou-se o erro percentual das reduções de espessuras do componente real em relação aos modelos denominados MOD1 e FER1. Notar que ambas as expressões matemáticas [6.2] e [6.3] dos critérios apresentados no item 6.2 foram utilizadas de acordo com os valores encontrados referentes a [REP_{real}] em confronto com [$REP_{simulação}$].

O resultado de erro relativo apresentado na tabela 8(a) referente à simulação inicial (MOD1) e a peça demonstram que cerca 50% dos pontos escolhidos para análise encontram-se fora do perímetro de aceitação para a peça. Reduções extremas de espessura (além dos 20% aceitáveis) são verificadas nos pontos 4, 5, 7 e ao extremo em 11 e 14 ao modelo MOD1. Ou seja, aqui encontramos uma condição totalmente desfavorável ao tryout. Na região dos raios do vão da porta, a elevada redução de espessuras provoca não somente deformações nestas zonas (que também são de difícil retrabalho), mas também podem apresentar retorno elástico fora dos valores e limites aceitáveis, causando o indesejável efeito ótico de variação do jogo e faceamento do conjunto porta-lateral (figura 8-15). Em síntese, já se verifica que o modelo utilizado para a verificação e validação do plano de métodos não poderia ser nunca empregado para análise e direcionamento ao tryout devido ao erro relativo entre estes modelos.

A simulação inicial do modelo FER1 foi realizada a partir dos dados obtidos da geometria digitalizada da superfície do ferramental (ou seja, da superfície que originou peça do primeiro tryout), utilizando-se do sistema ATOS[®] como descrito no capítulo 5. Os dados obtidos (nuvem de pontos) foram retrabalhados utilizando-se o software POLYWORKS[®], e pós-processados no programa CAD UG[®] da Unigraphics. Com essa geometria como ponto de partida, utilizando-se o software de simulação AUTOFORM[®] foi realizada a primeira simulação do lateral, a fim de obterem-se dados importantes para melhorar o tryout dos estampos de produção. Em termos de análise pelo Método dos Elementos Finitos, escolheu-se como ferramenta de análise o software AUTOFORM[®], pela praticidade, velocidade de modelagem, facilidade em modelar geometrias complexas e principalmente pelos ótimos resultados em termos de confronto com a fática relevada nas análises preliminares deste trabalho.

Os dados da simulação aqui apresentados para o modelo FER1 e representados na tabela 8(b) são, na teoria, o melhor resultado obtido com a simulação matemática, ou seja, aquilo que mais se aproxima do resultado obtido na prática, visto que o modelo geométrico utilizado para modelagem da superfície da ferramenta é o modelo digital da superfície da mesma. Uma simulação em AUTOFORM[®] deste conjunto lateral em duas operações (OP 20 e 30) é realizada em, aproximadamente, 40 horas de cálculo em uma Workstation HP com sistema operacional NT de última geração. O total de elementos utilizados para a discretização da peça foi 860.000 e, para a discretização dos prensa-chapas, foi de 230.000, considerando-se que essa malha foi criada diretamente (automaticamente) sem se considerar uma otimização por parte do software. Posteriormente, essa malha foi verificada quanto a critérios de construção, tendo sido analisado e publicado por Damoulis [31] com outras 20 horas de preparação do modelo.

Para a discretização deste modelo (FER1) foram respeitadas e verificadas todas as regras impostas e descritas no início deste trabalho quanto a, principalmente, a descrição dos raios geométricos destas (*offset*, Erro de deslocamento e Critério Angular), observando-se rigorosamente todos os quesitos apontados e colocados em discussão no desenvolvimento deste trabalho. Isto foi feito com o objetivo de eliminar possíveis variáveis que pudessem influenciar negativamente o resultado da simulação do modelo FER1. O resultado da simulação apresentado, em termos de distribuição de espessuras e como comportamento de retorno elástico dos raios,

será apresentado e analisado adiante, no mesmo modo na fase 2 deste método e com os mesmos critérios descritos nos capítulos anteriores.

Nas tabelas 11 (a) e (b), comparando-se o erro relativo encontrado, podemos facilmente verificar o quanto o modelo inicial (MOD1) é impreciso a respeito da nossa necessidade de informações para a realização do tryout. Isso demonstra que o caminho justo para a elaboração e planejamento de um tryout é a realização de um novo modelo onde a superfície geométrica é uma reprodução fiel da superfície do ferramental e que sejam também observadas regras claras de discretização deste modelo, a fim de se obter a convergência máxima dos resultados. O modelo FER1 demonstra ser muito mais preciso. Portanto, torna-se um modelo de referência poderoso para a análise do tryout.

Porém, a principal questão relacionada a este componente é a qualidade dimensional (retorno elástico) e a qualidade superficial (rugas e deformações). Para os mesmos pontos foram executadas análises dimensionais do componente em posição de montagem no veículo que, posteriormente, serão feitas utilizando-se uma técnica específica, com o uso dos “*Meisterbocks*”, (ver Apêndice B), ou seja, uma análise dimensional focada em medir o retorno elástico dos raios da região das portas. O uso dos “*Meisterbocks*” representa um diferencial nesta técnica porque, como será esclarecido posteriormente e descrito no Apêndice B, os “*Meisterbocks*” permitem que o componente venha dimensionado e analisado exatamente como vem montado na posição no veículo, aproximando-se da realidade do processo de armação da carroceria e, conseqüentemente, fornecendo medidas muito mais precisas a respeito do retorno elástico dos componentes, entre tantas outras informações que este meio pode disponibilizar ao corpo técnico.

O objetivo deste confronto analítico será encontrar denominadores comuns entre ambas as análises, seja uma análise obtida de um resultado “prático” (ou seja, resultado direto de um produto gerado por meio de um estampo) e dos resultados matemáticos “teóricos”, que são gerados através de simulação computacional. Para os dados “práticos”, ou seja, para a análise dimensional da lateral física, será utilizada uma nova técnica que vem sendo adotada e desenvolvida pelas montadoras de ponta no mundo automobilístico, que chamaremos de “*Análise Meisterbock*”.

Ainda para efeito de compreensão dos passos de processo, a comparação dos resultados teóricos com a simulação do modelo FER1 da superfície e da formação da geometria do componente durante o processo de estampagem (FER1), nas figuras 8-11(a)(b)(c)(d) verifica-se os quatro primeiros passos de conformação da lateral, utilizando-se as simulações em AUTOFORM, e nas figuras 8-12, 8-13 e 8-14 respectivamente, encontram-se os detalhes do comportamento do componente em relação ao ponto inferior (Bottom) do fechamento do estampo.

(a) 200 [mm] do fechamento

(b) 120 [mm] do fechamento

(c) 75 [mm] do fechamento

(d) 20 [mm] do fechamento

Figuras 7.11(a)(b)(c)(d) - Representação dos dados da simulação do modelo FER1 em sequência de fechamento do estampo.

Uma vez que o modelo FER1 comprovadamente porta um resultado muito mais preciso em confronto com os dados da peça, este modelo então vai ser estudado em detalhe de forma a estabelecer uma linha de atividades a serem executadas (tryout) para a melhoria qualitativa do componente (e, por consequência, a sua aprovação final por conta da qualidade assegurada).

Na figura 7.11(b), a condição de escoamento da chapa/estado de conformação a 20 [mm] do ponto de fechamento máximo é representada utilizando-se os dados da superfície do modelo FER1, onde, até este ponto, não se evidenciam criticidades ou extremas divergências entre as simulações anteriores entre a simulação do modelo digitalizado da superfície (FER1) e o componente físico estampado. Porém, na Figura 7.12, na condição de deslocamento do punção a 17 [mm] do ponto mínimo de fechamento inferior formam-se as primeiras não conformidades (rugas) que, em um primeiro momento, não eram evidentes ou não estavam previstas no modelo de construção inicial para o estudo de desenvolvimento do estampo. É neste ponto que o modelo FER1 começa a apresentar grandes divergências em relação ao modelo inicial que fora utilizado para o estudo de viabilidade construtiva e verificado no plano de métodos.

Figura 7.12 - Representação da posição 17 [mm] do ponto de fechamento do estampo para o modelo FER1. No detalhe se verifica a presença de uma não conformidade que, nesta condição, se elimina somente com retrabalho da superfície da peça terminada.

Anteriormente, quando foi desenvolvido o método de estampagem, tais problemas não foram previstos ou não foram identificados na intensidade tal como se apresentam agora na fase de tryout. Na prática, tais problemas devem agora ser resolvidos através de intervenções técnicas sucessivas até que o problema seja resolvido, com custos e tempo muitas vezes não permissíveis.

Outro claro ponto crítico deste componente vem com a simulação do modelo FER1 a 10 [mm] do fechamento do estampo e com o modelo fechado a 100% do curso de estampagem (ou a fim de curso), figura 8-13.

Figura 7.13 - Representação dos estágios de conformação 10 [mm] do fechamento e estampo completamente fechado (estado final) do modelo FER1. Notar nos detalhes 10 [mm] do fechamento o aparecimento de não conformidades estéticas na superfície da peça que são eliminadas somente através de retrabalho. No detalhe Estado final, a representação gráfica do estado de tensões.

Na Figura 7.13 demonstra-se claramente este fato, onde os detalhes a 10 [mm] do fechamento se evidenciam na parte alta da janela lateral (*Quarter Window*) e na linha de caráter da porta, com o aparecimento de “rugos” (ou seja, acúmulo de material provocado pelo fluxo de escoamento deste, exatamente na região evidenciada nos detalhes). Estas “rugos” não são facilmente eliminadas com um tryout comum, sendo necessário encontrar soluções técnicas alternativas para eliminá-las, ou somente através de retrabalho pesado (disco esmerilhador ou lima americana e posterior lixamento da superfície) se pode eliminar a deformação da superfície, o que implica em custos adicionais, podendo causar problemas de qualidade sensíveis ao cliente (visto que a zona onde se encontra a anomalia é uma zona visível) ou problemas de pintura (devido à qualidade final da superfície da chapa).

Uma vez analisada a condição dos resultados de estampagem do modelo FER1, o próximo passo será analisar a condição geométrica do componente no que se refere à sua dimensão. Os resultados obtidos na análise do modelo FER1 deixam claro que o método inicial proposto ao componente não é robusto o suficiente para permitir que o estampo entre em produção, requerendo intervenção técnica para o reparo destas anomalias. Como próximo passo, se fará a análise técnica do dimensional obtido da estampagem deste componente, utilizando-se o suporte do “*Meisterbock*” carroceria. Tal modelo de análise se denominará FER2.

7.3.3 Análise do modelo dimensional FER2

Como próximo passo antes da decisão final das intervenções técnicas, deve-se analisar a condição dimensional em que se encontra o componente em questão, o que poderá resolver os problemas técnicos apresentados na superfície da peça. A condição dimensional é de extrema importância para a qualidade final percebida pelo cliente, importante para a funcionalidade do componente (no caso, a questão analisada neste trabalho como indicação técnica é o perfil e o faceamento da porta na lateral e o acabamento superficial (*matching*) da janela lateral (*quarter window*) e da c da lateral). Para tal análise do modelo denominado FER2, será empregado, como já descrito, o “*Meisterbock*” carroceria (Apêndice B). A Figura 7.14 mostra um “*Meisterbock*” completamente montado, com todos os componentes laterais (as laterais são subconjuntos soldados, e não laterais singulares (peças únicas)), com todos os componentes externos (no caso

da Figura 7.14 nota-se a presença das lanternas posteriores para análise da condição de *matching* da lateral com as mesmas) que formam a parte estética exterior sensível para o cliente e para a auditoria de Qualidade interna do produto.

Figura 7.14 - Representação física das laterais externas posicionadas no “Meisterbock”. A análise física deste componente criará um modelo que denominaremos FER2, ou seja, a análise dimensional física da peça.

Na figura podem ser identificada na superfície da peça etiquetas com os valores encontrados na superfície da lateral que representam os valores geométricos (ou dimensionais) daquela posição em relação ao sistema de coordenadas do veículo, em posição de uso, tal como o cliente vê a lateral, folga e faceamento da porta no veículo. Na Figura 7.15, apresentada mais à frente, se verifica o detalhe de uma porta montada em uma lateral de primeiro tryout. No detalhe dos círculos é possível notar alguns pontos de variação geométrica (ou retorno elástico) da zona lateral do quadro da porta, onde o retorno elástico é mais propenso, devido ao tipo de geometria local e também devido ao fato de que, nesta região, temos uma forma de repuxo mais propenso ao estiramento (estirado sobre o raio da matriz) já explicado em [31]. De fato, o próprio raio nesta região é um dos fatores principais seja estético (contribui o efeito “*gap*”, ou seja, folga) da porta

como também ao retorno elástico. Uma das vantagens desta técnica consiste no fato de que uma vez digitalizada a “verdadeira” superfície do estampo e depois simulada a condição real de repuxo, pode-se obter resultados reais muitos mais próximos do verdadeiro valor de raio do que se dependêssemos da experiência do ferramenteiro de tryout. O ferramenteiro executa o seu tryout passo a passo, até encontrar o raio correto que possa minimizar ou eliminar o retorno elástico nesta região e melhorar o efeito de “gap” na porta e lateral.

Também não pode ser desconsiderado que também a porta (no caso corte interno do painel interno grafado sobre o painel externo) contribui consideravelmente para o efeito “gap”. Muitas vezes, os fabricantes de automóveis cansados do pouco resultado atingido com a lateral (muitas vezes também em termos de tempo e custos) trabalham no refinamento destes “gaps” ou folgas aumentando ou diminuindo a grafatura da travessa interna ou externa, porque é mais fácil (e menos custoso) trabalhar a porta do que trabalhar os raios da lateral. O problema é que manter a qualidade dos raios ao longo do tempo é muito mais difícil do que manter o raio da lateral em geometria, sendo necessário um retrabalho (e manutenção) maior nas ferramentas de grafatura e estampo de corte do painel interno, no caso das portas do que aos estampos da lateral. No entanto, a análise desta técnica e destas considerações não será abordada neste trabalho.

A Figura 7.15 demonstra claramente este aspecto. Identificam-se nesta Figura os problemas de qualidade referentes à folga entre porta e lateral. Tal como se pode verificar na Figura 7.15, os pontos (a) e (b) são os pontos onde os ferramenteiros teoricamente devem trabalhar no tryout, de forma a resolver e eliminar este problema o mais rápido possível. Além disso, este é o tipo de não conformidade geométrica ou não qualidade do produto que o cliente jamais aceitaria. Também neste caso é praticamente impossível retrabalhar raios da lateral de modo a tornar o veículo “aceitável” ao cliente. Portanto, cabe à Engenharia de Manufatura Estampos, Produção Estamparia e Ferramentaria resolver a questão da forma menos onerosa possível e mais rápida. Mas isso, infelizmente, muitas vezes não acontece.

Figura 7.15 - Análise de uma lateral de primeiro tryout no *Meisterbock* em relação à porta. Na figura se evidenciam os problemas (a) deformação; (b) deformação e/ou retorno elástico excessivo, contribuindo para o problema de definição dos “gaps” da porta (abertos ou fechados), ponto fundamental de qualidade ao produto; (c) deformação na grafatura da porta (aspecto que não será avaliado neste trabalho).

O que se verifica em muitos casos é um caos dentro das inúmeras intervenções técnicas de “tentativa e erro” de reposicionar a porta corretamente dentro do vão da lateral, inutilmente. Na Figura 7.16, apresentada a seguir, encontram-se os valores geométricos encontrados medindo-se os pontos de 1-11, tal como representados no modelo da Figura 7.7. Tais pontos representam o contorno visível da porta e janela lateral, de grande impacto qualitativo ao cliente. Na tabela 9 encontram-se os valores listados medidos no dispositivo *Meisterbock* simulando os valores reais que o cliente encontraria no processo/produto, ou seja, os valores reais de folga e faceamento destes pontos. O modelo de dados então criado, denominado FER2, apresenta os valores de verdadeira grandeza que se evidenciam na peça real de primeiro tryout, cuja superfície de estampo foi digitalizada, criando-se o modelo simulado FER1.

Figura 7.16 - Valores geométricos dimensionados no *Meisterbock* representando o modelo FER2 (medidos utilizando-se máquina de medição por coordenadas). Os valores encontram-se listados na tabela 9. Nota-se também o vidro lateral posicionado na lateral de forma e verificar-se o *matching* deste com o contorno da peça estampada. Os valores se referem a uma peça de 1º tryout com referência ao estampo digitalizado para obtenção do modelo FER1.

Em termos teóricos, os valores (retorno elástico) que se evidenciam no modelo FER2 devem ser compatíveis com os valores encontrados no modelo FER1. Em outras palavras, criou-se um sistema modelo-simulação, ou seja, se retornarmos à figura esquemática, a fase denominada confronto comparação foi finalizada (1.Fase), onde se estabeleceu um sistema. Os engenheiros, a partir deste momento, utilizarão os resultados e o modelo FER1 para “simular”, modificar e analisar possíveis propostas técnicas de modificação da superfície do estampo, ao invés de realizar tentativas e erro. Posteriormente, será feita também uma análise e balanço financeiro

deste trabalho e técnica. Na Tabela 9 estão relacionados os números medidos na peça do primeiro tryout, que denominaremos FER2.

(a) Dimensões Peça física FER2 (Máquina Medição por Coordenadas)											
FER2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
X _(folga)	-	-0,2	-1,1	-1,1	+0,6	+0,5	+0,6	+1,2	+1,4	+0,6	-
Y _(perfil)	-0,3	-0,5	-0,6	+0,9	+1,2	+0,8	+0,5	+0,4	+1,1	-1,0	-
Z _(altura)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+1,5
(b) Dimensões Calculadas Modelo FER1 (AUTOFORM[®])											
FER1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
X _(folga)	-	-0,2	-0,8	-0,9	+0,1	+0,9	+0,8	-0,2	+0,8	+0,3	-
Y _(perfil)	-0,5	-0,5	-0,4	+0,6	+1,0	+0,4	+0,2	+0,3	+0,9	-0,7	-
Z _(altura)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+1,1
(c) Dimensões Calculadas Modelo MOD1 (AUTOFORM[®])											
MOD1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
X _(folga)	-	+0,1	-0,5	-0,5	-0,3	+0,6	+0,5	-0,2	+0,6	+0,2	-
Y _(perfil)	+0,1	+0,3	+0,2	-0,0	+0,5	+0,4	+0,3	+0,3	+0,5	-0,5	-
Z _(altura)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+0,4
Cotas Nominais e Tolerâncias: Folga (X) 4,8^{-1,0/+0,6} ; Perfil (Y) 0,0^{0,0/+1,0} ; Porta (Z) 0,0^{0,0/+0,5}											

Tabela 9 (a)(b)(c): Representações dos desvios geométricos referidos aos modelos MOD1 (modelo de análise da condição do método proposto, dimensão lado esquerdo com referência matemática), FER1 (modelo simulado da superfície digitalizada do ferramental) e do modelo FER2 (descrição geométrica dimensional da lateral física, dimensionada a Meisterbock utilizando-se uma Máquina Medição por Coordenadas [MMC]. Nota-se claramente a diferença nos valores dos desvios encontrados entre os modelos em relação à tolerância nominal especificada.

Para efeitos comparativos, os valores teóricos de possíveis retornos elásticos encontrados nas simulações (programa AUTOFORM[®]) dos modelos FER1 e no modelo originário (MOD1) foram representados nas Tabelas 12(b) e 12(c) respectivamente. Nota-se que somente o ponto (11) possui uma coordenada em (z) por se tratar de um ponto sobre a linha de caráter com uma componente em altura, utilizada para análise comparativa de posicionamento da porta em relação à altura da lateral (Fig.7.16). As tolerâncias foram especificadas conforme o plano de montagem do veículo, com cotas e tolerâncias referidas à carroceria na armação (e não na montagem final do veículo), ou seja, sem a compensação de peso dos componentes da porta (na montagem) tal como solicitado no plano de fabricação da carroceria. Como se pode notar, quando se verificam

os valores da Tabela 9(c), ou seja, valores de retorno elástico previsto no MOD1, a resposta que se tem de imediato é aquela de um modelo de simulação, onde os resultados, à primeira vista, estão todos corretos. Mas, se confrontamos estes números do MOD1 com os números encontrados na análise física da peça real posicionada no Meisterbock (ou seja, em condição real de processo), verificou-se uma grande divergência entre estes. Ou seja, mais uma vez se verifica que a ferramenta parte de um modelo de estudo de viabilidade que não mais corresponde à real situação ou ao real comportamento desta ferramenta. Portanto, o modelo MOD1 não poderá jamais servir de base a uma nova simulação para se verificar a viabilidade das propostas técnicas das intervenções necessárias de tryout. No caso do modelo FER1 (Tabela 9(b)), como resultado de uma simulação realizada a partir da superfície fresada do estampo criado, verifica-se uma maior proximidade e convergência dos dados em confronto com o modelo FER2, sensivelmente melhorado em relação ao modelo MOD1. Em outras palavras, podemos tomar o modelo FER1 como um ponto de partida para checar as propostas técnicas de tryout no estampo. Confrontando-se os modelos FER1 e FER2, verifica-se que, embora ainda exista uma diferença nos resultados, a tendência dos resultados segue a direção de retorno elástico (+/-) das folgas e do faceamento da lateral da porta e áreas superiores da janela lateral do veículo em questão. O modelo de elementos finitos FER1 então será utilizado neste *looping* para verificar a viabilidade de tryout dos pontos críticos do componente. Neste trabalho, para fins expositivos, serão analisados no modelo FER1 os pontos de 1 a 16, como representados na Figura 7.8, em diferentes modelos de engenharia reversa.

Confirmada a viabilidade do modelo FER1, na Figura 7.17 é possível verificar o primeiro uso deste modelo ao tryout. Baseado na redução de espessuras do material, a representação da Figura 7.17 torna-se a primeira referência de utilidade aos ferramenteiros de tryout, que utilizam os dados para detectar na superfície da ferramenta as zonas críticas e fundamentais ao tryout em relação ao escoamento de material na superfície do estampo. Sendo FER1 um modelo “mais” preciso em relação ao resultado físico (FER2) e também em relação ao modelo MOD1 (condição de projeção do ferramental e viabilidade do plano de métodos), os ferramenteiros podem traçar um estudo de tryout com foco na redução de espessuras, nos retornos elásticos indesejáveis (que, por sua vez, contribuem para a variação geométrica do componente e, por consequência, ao veículo) e nos defeitos de superfície.

Figura 7.17 - Representação do modelo FER1 em relação à redução de espessuras (pontos críticos) e, no detalhe, a que distância do fechamento ocorre a redução máxima da espessura para fins de direcionamento aos ferramenteiros no tryout.

Segundo o modelo FER1, os pontos representados na Figura 7.17 são as reduções críticas de espessura ao longo da superfície e no detalhe a distância em que estas reduções ocorrem antes do fechamento total do estampo. Estas informações são fundamentais para os ferramenteiros que, uma vez que conhecem e sabem onde a chapa inicia a escoar em excesso (provocando desde a redução excessiva da espessura fora dos limites aceitáveis até a ruptura completa ou contribuindo a formação de rugas sobrepostas), estes podem iniciar o tryout e, assim, terão ideia de como modificar a superfície de forma a reduzir ao mínimo ou impedir este escoamento excessivo. Também na Figura 7.17, os pontos identificados são considerados de alta criticidade, pois ou tenderão possivelmente ao rompimento da peça ou tenderão à formação de rugas. Os pontos onde as distâncias estão marcadas em vermelho são ainda mais críticos, pois nestas localizações temos

o risco de deixar deformações permanentes na superfície da peça; muitas vezes nem com retrabalho pesado se pode eliminar, causando diversos problemas, inclusive desgaste prematuro do estampo se não eliminados. Os pontos marcados com (a) e (b) também provocam problemas graves na superfície da peça, como no ponto (a), onde se evidencia que a 22 [mm] do fechamento completo do estampo, a região interna da porta começa a escoar de modo mais veloz que a parte lateral interna. Esse fenômeno é devido ao engripamento da ferramenta (punção que vai de encontro excessivo à parede da matriz).

No ponto (b), por exemplo, temos como escoamento indesejável nesta região a formação de uma ruga sobreposta, exatamente no ponto de junção do para-choque traseiro do lado esquerdo com a lateral. Rugas formadas nesta região são altamente prejudiciais à qualidade do componente, extremamente onerosas e difíceis de serem removidas com retrabalho, deixando sempre marcas na superfície da peça. Este ponto não será discutido neste trabalho.

Para os pontos (a) e (b) em questão, ambos não foram evidenciados no modelo MOD1 porque o mesmo foi construído com dados matemáticos de origem CAD, e não evidenciavam tal interferência (a) e formação de ruga (b) nestes locais. Como o modelo FER1 é elaborado a partir de dados digitalizados da ferramenta real, então neste tipo de modelo podemos verificar a presença deste tipo de não conformidade, que pode causar inúmeros outros problemas (retorno elástico, ondulações até rompimento local) e, por consequência, danos à superfície e à geometria da peça. Mais uma vez, se comprova a viabilidade e retorno ao se executar um modelo de simulação de estampagem construído com a superfície digitalizada do estampo de forma a facilitar e guiar o tryout deste.

Nos pontos (2)(3) e (4), o problema causado pelo escoamento através do raio da soleira e do raio da porta consequentemente provoca deformações excessivas e indesejáveis nesta região. Mesmo sendo uma região considerada “baixa” ao cliente, ou seja, a posição destes pontos em relação ao problema que causa não seria um problema se a deformação fosse interna à porta e se não provocasse uma deformação no raio externo da lateral (provocando, por consequência, um problema de folga e faceamento neste local, tal como se evidencia no modelo FER2 (dimensional a *Meisterbock*) representado na Tabela 9(a) deste Capítulo). Neste ponto, no procedimento

“normal” da chamada “tentativa e erro”, o ferramenteiro iniciaria uma série de tentativas de modificar o raio da lateral até eliminar a deformação. Mas, em uma análise mais detalhada destes pontos verificamos que não é somente uma questão de modificar o raio, mas modificar também a forma baixa desta região (linha marcada da lateral para efeito estilístico de robustez e de forma a aumentar o escoamento neste ponto, para compensar o escoamento de material do raio), de modo a alterar o escoamento local e, conseqüentemente, o retorno elástico do raio (eliminando por completo o mesmo). Com o modelo FER3 adiante verificaremos a eficácia das opções de tryout estudadas para este local.

Para o ponto (8), a eliminação do engripamento do punção interno (ponto (a) da Figura 7.17) e uma modificação localizada no raio desta zona, deve eliminar o problema (ver valores na Tabela 9(a) FER2). A eficácia e análise desta opção de tryout serão verificadas nos modelos FER3 e FER4 adiante.

Para os pontos (10)(14) e (16) a situação é mais crítica. Nestes pontos, a análise do modelo de simulação FER1 mostrou que a geometria local não é apropriada a este tipo de repuxo e nem a este material. Como em termos de material não se pode fazer nada, pois o material especificado na lateral é o 56DX (Apêndice A), material este de aplicação típica indicada para este tipo de componente e vastamente utilizado pela indústria automobilística global, então a proposta mais indicada é aquela de efetuar uma modificação geométrica local capaz de compensar o escoamento do material.

7.3.4 Propostas Técnicas de Tryout ao Modelo FER1

Neste tópico iniciaremos a análise das propostas de soluções técnicas aos pontos não conformados evidenciados no tópico anterior, e que, posteriormente aplicadas ao estampo, serão novamente confirmadas em um novo *looping* de simulações e digitalizações da superfície deste estampo (que denominaremos FER3) e nova análise de um componente pós-tryout que denominaremos FER4 (ou seja, a peça física estampada com o tryout realizado segundo as propostas apresentadas, verificadas na FER1 e depois reconfirmadas no modelo de simulação FER3).

Iniciando com a análise dos pontos (2)(3) e (4), tal como já apresentado no tópico anterior, a proposta analisada de forma a melhorar o raio nesta região e a ser verificada modificando-se o modelo de simulação FER1 é apresentada na Figura 7.17.

Figura 7.18 - Análise técnica efetuada em simulação utilizando-se o modelo FER1 como base para os pontos (2)(3) e (4). Nota-se no detalhe a proposta de redução de 08 [mm] do repuxo na zona da linha de caráter inferior (linha de estilo) junto com a modificação do raio da borda do vão de porta (definição de folga da porta).

A proposta para a eliminação da deformação local (ponto 2), bem como melhorar a folga da porta e lateral foi modificar o raio de passagem de superfícies nestas áreas. Para a análise desta modificação foram efetuados quatro variações desta proposta, sempre partindo do modelo certificado FER1, com diversas combinações de raios (para o ponto 2 variado de 07 a 12 [mm] e para o ponto 3 variado de 20 a 25 [mm]) e alturas de repuxo de 04 a [10] [mm], tal como no detalhe da Figura 7.17. Cada variante levou cerca de sete horas de processamento, utilizando-se AUTOFORM® e as condições destas simulações são as mesmas do modelo FER1, descritas em 7.1.3. Nota-se que este tipo de intervenção técnica, em termos de tryout, representa um dos mais

difíceis para o ferramenteiro que o executa segundo a sistemática da “tentativa e erro”. Ou seja, se fosse seguida essa ideia, a cada intervenção (ou, digamos, tentativa de execução desta) deve-se fechar a ferramenta e executar novo tryout embaixo de prensa, estampando o componente para observar-se o resultado. Com as simulações, embora cada uma custe à empresa cerca sete horas de computação, ainda é a opção mais rápida, econômica e confiável, como veremos nas Conclusões (Capítulo 9).

Para o ponto (8), como já descrito anteriormente, uma vez verificado no tryout (e no modelo FER2, bem como nos dados do escaneamento da superfície do estampo) este ponto tem tendência a melhorar somente com a eliminação desta interferência (ou engripamento) do punção com a matriz, tendencialmente “esmagando” a chapa nesta região, Figura 7.17(a). Será verificado novamente este ponto após a execução e construção do modelo FER3 (construído com o novo escaneamento da superfície após implementação das melhorias para os pontos não conformados, como demonstrados neste tópico).

Na Figura 7.19 verifica-se no detalhe 1 a modificação proposta para a eliminação da ondulação e, conseqüentemente, a melhoria da geometria (FER2, Tabela 9(a), e também como não conformidade no modelo FER2) local, onde estas não conformidades são aquelas observadas no detalhe da Figura 7.13. Como se pode verificar, devido à mudança de plano de superfície que abruptamente termina com a flangeadura do vão da porta, a tendência local é de “sobrar” material, ou seja, é normal que se observe um “acréscimo” de superfície local (aumento de volume), tal como se evidencia nos modelos FER1 e FER2. Portanto, a única solução é inserir na superfície da ferramenta um artifício chamado na prática de “mata-ruga”. No detalhe (1) da Figura 7.19, (relativo aos pontos 10 e 11) se verifica a proposta com a indicação no detalhe. Essa modificação, uma vez aprovada pelo centro de estilo, deveria ser provada cuidadosamente, entretanto, pela ferramentaria em “tentativa e erro”. Mas, como temos nesta fase um modelo confiável (FER1), podemos provar a modificação na sua superfície, de forma a encontrar matematicamente a melhor superfície possível, a melhor altura de repuxo e o local mais provável de obter-se êxito com esta modificação. A mesma coisa foi feita com o detalhe 2, ponto (16) onde, para se eliminar a deformação interna causada pela redução extrema de espessura (Figura 7.13) e escoamento de material em direção imprópria, foi implementado um rebaixo de modo a guiar o escoamento aliviando assim a redução extrema local de espessura.

Figura 7.19 - Representação das propostas de tryout dos pontos (10) (e também, por consequência, o ponto 11 ao lado) no detalhe (1) e para o ponto (16) no detalhe (2). Nota-se que, para a resolução das não conformidades destes pontos, foram inseridas modificações geométricas de compensação na superfície do estampo.

Para o ponto (14) da Figura 7.17, devido à complexidade técnica desta região e a sensibilidade desta, pois é um ponto de referência geométrico para a construção do veículo, a decisão técnica foi modificar o perfil de repuxo em toda a zona do vidro lateral. Na Figura 7.13 se verifica no detalhe a deformação da superfície causada por esta não conformidade, defeito este que é praticamente impossível eliminar com retrabalho, causando efeitos indesejáveis visíveis na superfície bem como interferência na montagem do vidro lateral. Vale a pena ressaltar que estes pontos não conformes mais uma vez não se verificavam no modelo MOD1 de estudo da peça.

Aos pontos (13)(14) e (15) se propõe uma modificação de secção, onde a altura do repuxo, profundidade e ângulo de saída, em todo o contorno, vem modificado tal como ilustrado na Figura 7.20.

Figura 7.20 - Proposta de modificação técnica dos pontos (13) e (15). Na figura se evidenciam nos detalhes das secções A-A (ponto 15 e também similar ao ponto 13) e B-B (ponto 14)

Na verdade, todo o contorno da região do vidro lateral se mostrou problemática desde o início do projeto. Como o modelo construído para análise da viabilidade do plano de métodos desta peça (MOD1) não representa em todo o resultado efetivo encontrado na peça, toda esta área em torno ao vidro foi subestimada em termos construtivos. A proposta então para recuperação destas secções se verifica na Figura 7.20. Na secção A-A, referente ao ponto (16) (e que também corresponde ao ponto (13) do lado oposto ao vão do vidro), a proposta para eliminar uma deformação (ondulações) que ocorrem em praticamente em toda a zona próxima aos pontos (13) e (16), é de aumentar em 10 graus o ângulo da saída de repuxo. Já na secção B-B, ponto (14), está um dos mais críticos pontos de não conformidade desta peça, pois, justamente nesta área, se encontra a referência de posicionamento de construção e montagem na direção de (Z). Grande parte do erro geométrico de posicionamento em altura da parte posterior da lateral externa vem do erro da superfície deste ponto. A solução encontrada e simulada foi alterar a altura de repuxo

do contorno nesta zona, tal como indicada na secção da Figura 7.20, resolvendo o problema da deformação da superfície neste ponto. Também é sugerido alterar os raios internos e externos do vão do vidro, de forma a não só melhorar o aspecto ótico do contorno da janela, como também melhorar toda a zona de repuxo desta janela (aliviando as tensões nas bordas).

7.4 Modelo FER3

Depois de aplicadas as modificações de tryout no estampo, tal como descrito no tópico anterior, mais uma vez se executa o escaneamento da superfície deste, analisando-as exatamente nas áreas propostas.

A superfície obtida a partir deste escaneamento foi utilizada para a atualização do modelo CAD1, denominado agora CAD2, ou seja, a superfície que agora foi modificada a partir das recomendações de tryout guiado (e não mais por tentativa e erro). Com base nos dados matemáticos atualizados, construímos um modelo denominado MOD2 para a análise da superfície e malha de elementos finitos que, por sua vez, segundo o fluxo de trabalho, será utilizada na modelagem do modelo FER3. Em outras palavras, um novo modelo de elementos finitos no qual a superfície de tryout atualizada foi novamente simulada segundo o MEF, aplicando-se o *software* AUTOFORM®, verificando-se se os resultados deste modelo para os pontos propostos (Figura 7.8) convergem para os resultados físicos obtidos para a peça estampada (FER4), reposicionada em Meisterbock e medida novamente com uma MMC (máquina de medição por coordenadas, dando origem, assim, ao modelo FER4). O modelo em elementos finitos que compõe MOD3/FER3 é basicamente o mesmo modelo discreto modelado para FER1 (ver tópico 7.3.1), com a atualização da superfície matemática. Todas as forças e condições de contorno foram importadas para este modelo, segundo o procedimento descrito no tópico 7.3.1, sendo que estas foram mantidas como na condição inicial do plano de métodos propostos.

7.4.1 Calibração e análise do modelo FER3

Tal como descrito em 7.3.2, o procedimento de calibração executado é o mesmo tal como para o modelo FER1, ou seja, confrontar os dados da simulação do modelo FER3 construído com a superfície real digitalizada a partir das modificações propostas, utilizando-se a FER1 e as análises numéricas (dimensionais) da FER2, confrontados com os dados reais de processo (resultados reais obtidos).

Na Tabela 10 encontram-se os dados desta simulação confrontados com os dados originais da peça, seja na peça com a condição inicial e a peça depois do primeiro tryout executado (cuja peça dará origem ao modelo dimensional FER4 dimensionado no Meisterbock), com os modelos de simulação FER1 e FER3.

Posição	Lado A	Lado B	Lado C	Lado D	Lado E	Lado F
Peça Real inicial [mm]	22	62	88	44	58	76
Peça Real pós-tryout [mm]	21	64	85	44	56	78
Simulação FER1 [mm]	21	55	79	47	52	62
Simulação FER3 [mm]	21	60	83	46	55	74

Tabela 10 - Resultado comparativo entre o escoamento da platina (em relação ao seu perímetro inicial) entre a peça real (operação 20) antes e depois do primeiro tryout e as simulações (com inserção local de “drawbeads” tipo “meia-cana”) para os modelos FER1 e FER3.

Observando-se os dados na Tabela 10, percebe-se que se comparando os valores encontrados no cálculo que o modelo FER3 possui uma aproximação maior (convergência) aos resultados encontrados do que seu modelo antecessor (FER1).

Desta forma, pode-se tomar o modelo FER3 agora como modelo-base para o refinamento do tryout a ser executado na peça. O modelo FER3, em termos de resultados, deve ser um modelo onde os dados encontrados fazem parte de um mundo virtual muito mais próximo dos resultados finais físicos encontrados no FER4. Neste ponto, observa-se também que o FER3, em termos comparativos, nada mais representa em termos de resultados ao MOD1.

O modelo FER3 foi então completamente simulado em AUTOFORM®, sendo os resultados dos pontos críticos (de 1 a 16) representados na Tabela 11. Nesta Tabela, verificamos os resultados de redução de espessuras no modelo FER3, tabulados segundo o mesmo critério de análise de FER1 e MOD1 (Tabela 11(a) e Tabela 11(b)). O erro relativo [%] encontrado nas Tabelas 11 (a) e (b) foram repetidos nas duas primeiras linhas desta para efeito comparativo com o erro relativo calculado comparando-se ao resultado encontrado no modelo FER3 e das espessuras encontradas na peça oriunda do tryout realizado pós-modelo FER1 (peça do 1. tryout físico real) medindo-se por ultrassom as mesmas.

Na Tabela 11 se nota com grande diferença (comparando-se as cores) os valores encontrados segundo o critério estabelecido em [31] entre os modelos MOD1 e o modelo FER3. O modelo FER3 é muito mais estável e os resultados convergem em relação às espessuras encontradas na peça. Percebe-se então a perfeita correlação entre espessuras encontradas (medidas) e espessuras calculadas através do MEF (FER3). Portanto, o modelo FER3 torna-se uma poderosa fonte de informação para a execução de qualquer análise ou verificação de viabilidade construtiva na superfície da ferramenta. Servirá também de base para verificação de certos conceitos construtivos e de *design* que poderão servir a futuros modelos de classe semelhantes. Também nota-se já a diferença entre os resultados encontrados, comparando-se os erros relativos entre os modelos FER1 e FER3, embora os resultados encontrados em FER1 não deixem a desejar em termos de precisão numérica, podendo, sem dúvida, serem adotados como base referencial para a análise primária do tryout.

Observa-se nos pontos (11) e (14), como já discutido, que se trata de pontos onde uma típica solução “tentativa e erro” custariam muitas horas de tryout e sem garantias de se chegar a um resultado como este. Para estes pontos nota-se uma redução muito menos acentuada da espessura e praticamente todas as ondulações nestas zonas provenientes do escoamento acentuado desapareceram da superfície da peça, eliminando por completo a necessidade de retrabalho.

Redução de espessuras [REP] [%]– Modelo MOD1 (Condição inicial) e Componente																
Erro Relativo	6,6	3,8	0,3	30,2	22,8	18,6	29,7	2,5	14,7	4,2	41,4	7,9	15,3	50,3	0,0	6,2
Redução de espessuras [REP] [%]– Modelo FER1 e Componente																
Erro Relativo	2,0	0,6	4,7	2,3	19,3	8,8	13,9	2,9	3,8	15,3	19,8	9,5	2,0	23,2	9,9	0,0
Redução de espessuras [REP] [%]– Modelo FER3 e Componente apos 1. tryout (FER2)																
Pontos	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16
REP_{Real}	13,4	13,7	18,2	18,9	17,3	7,2	7,4	16,4	18,2	22,4	19,2	19,8	12,2	23,4	11,1	22,6
REP_{AUTOFORM}	10,9	11,9	20,8	20,8	17,8	8,4	8,5	13,2	15,3	19,9	15,2	17,1	11,2	23,9	9,9	21,9
Erro Relativo	4,4	1,7	3,0	0,5	7,8	8,7	9,6	8,3	5,6	2,5	11,6	3,9	9,8	11,7	8,8	6,3

Tabela 11 - Análise da distribuição de espessuras (em valores percentuais) na peça real do 1.tryout da lateral modelo 955 com os resultados da simulação do modelo FER3, comparados ao modelo de condição inicial denominado MOD1 e a simulação realizada para o modelo FER1 da figura acima. Na figura foram evidenciadas e numeradas as zonas críticas de interesse para a análise deste trabalho.

7.5 Análise do modelo dimensional FER4

Da mesma forma como demonstrado no tópico 7.3.3, novamente partindo-se do estampo pós-tryout, e realizadas as intervenções técnicas para os pontos descritos neste trabalho, então o estampo é novamente fechado e um novo *looping* de peças estampadas é iniciado. Ao modelo dimensional criado a partir da medição em *Meisterbock* da peça estampada do lote sucessivo (precedente ao modelo FER2 com as modificações propostas executadas no estampo, ou seja, compreendendo o segundo tryout), daremos o nome de FER4.

Na Tabela 12 encontramos o confronto entre FER1, FER2, FER3 e FER4, partindo do modelo MOD1. Os valores representados na Tabela 12 foram importados para comparação das Tabelas 9 (a)(b) e (c). Observando-se os valores das Tabelas 12(d) e (e), ou seja, o confronto entre os modelos FER3 e FER4, percebemos o quanto estes modelos passaram a convergir depois de dois *loopings* de escaneamento superficial do estampo de repuxo e calibragem desta peça, apresentando um ótimo resultado e comprovando a eficácia do método apresentado. O modelo FER4 comprova quão preciso se tornou o modelo virtual FER3, em termos de capacidade de previsão de resultados, apontando diretas soluções ao tryout da ferramenta, sem a necessidade de recorrer ao velho método de “tentativa e erro” por parte dos ferramenteiros. Importante também notar o salto de qualidade excelente observado entre os modelos FER2 e FER4, em termos dimensionais. Como já dito anteriormente, as laterais de um veículo automotivo apresentam extrema dificuldade técnica construtiva, requerendo, por diversas vezes, vários *loopings* (sempre em tentativa e erro), até que os resultados sejam maturados.

Verifica-se que o modelo FER4 sofreu um grande avanço positivo graças à leitura dos dados da simulação dos modelos FER1 e FER3 (onde se comprovou a eficácia das diversas soluções técnicas propostas e apresentadas neste trabalho). Com dados confiáveis como estes disponíveis (FER1, FER2, FER3 e FER4), os profissionais da ferramentaria podem direcionar o tryout do ferramental, ganhando tempo e economizando verba de projeto e, sem dúvida, melhorando rapidamente a qualidade final do componente.

(e) Dimensões Peça física FER4 (Máquina Medição por Coordenadas)											
FER4	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
X _(folga)	-	-0,3	-0,4	-0,3	+0,2	+0,5	+0,5	+0,5	+0,6	+0,4	-
Y _(perfil)	-0,1	0,0	+0,2	+0,3	+0,3	+0,4	+0,4	+0,1	+0,3	+0,1	-
Z _(altura)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+0,5
(d) Dimensões Calculadas Modelo FER3 (AUTOFORM [®])											
FER3	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
X _(folga)	-	-0,1	-0,2	-0,2	+0,2	+0,5	+0,6	-0,1	+0,5	+0,3	-
Y _(perfil)	0,0	0,0	0,0	+0,4	+0,7	+0,5	+0,4	+0,4	+0,8	0,0	-
Z _(altura)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+0,8
(a) Dimensões Peça física FER2 (Máquina Medição por Coordenadas)											
FER2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
X _(folga)	-	-0,2	-1,1	-1,1	+0,6	+1,1	+1,2	+0,4	+1,4	+0,6	-
Y _(perfil)	-0,3	-0,5	-0,6	+0,9	+1,2	+0,8	+0,5	+0,4	+1,1	-1,0	-
Z _(altura)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+1,4
(b) Dimensões Calculadas Modelo FER1 (AUTOFORM [®])											
FER1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
X _(folga)	-	-0,2	-0,8	-0,9	+0,1	+0,9	+0,8	-0,2	+0,8	+0,3	-
Y _(perfil)	-0,5	-0,5	-0,4	+0,6	+1,0	+0,4	+0,2	+0,3	+0,9	-0,7	-
Z _(altura)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+0,7
(c) Dimensões Calculadas Modelo MOD1 (AUTOFORM [®])											
MOD1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
X _(folga)	-	+0,1	-0,5	-0,5	-0,3	+0,6	+0,5	-0,2	+0,6	+0,2	-
Y _(perfil)	+0,1	+0,3	+0,2	-0,0	+0,5	+0,4	+0,3	+0,3	+0,5	-0,5	-
Z _(altura)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+0,3
Cotas Nominais e Tolerâncias: Folga (X) $4,8^{-1,0/+0,6}$; Perfil (Y) $0,0^{0,0/+1,0}$; Porta (Z) $0,0^{0,0/+0,5}$											

Tabela 12(a)(b)(c)(d)(e) - Representação dos desvios geométricos referentes aos modelos MOD1, FER1, FER2, FER3 e FER4. Nota-se claramente a diferença nos valores dos desvios encontrados entre os modelos, em relação à tolerância nominal especificada, evidenciado em cores.

7.6 Análise geral dos dados e comparação entre modelos FER'n'

Em termos gerais, ainda seguindo a linha de análise do tópico anterior, nota-se o alto grau de evolução dos modelos. Verificando-se a Tabela 12, notamos o quanto evoluiu o modelo FER3 em relação ao modelo FER1 em termos de resultados. Porém, não podemos esquecer que existe uma linha de “maturidade” no confronto entre os dados. Ou seja, a cada novo looping de interação que se executa, a cada nova digitalização e a cada novo modelo simulado segundo o MEF, como consequência melhoramos notavelmente o output de dados destes modelos. O mesmo ocorre quanto mais tryout realizamos, nova digitalização e atualização do modelo CAD. Quanto mais definimos, testamos modificações e propostas ao tryout nos modelos de engenharia reversa, menor é a propensão de “tentativa e erro”.

Em termos gerais, após a execução e análise de 4 modelos denominados Ferramentas de Engenharia Reversa (FER'n'), podemos analisar a sequência observando os resultados da seguinte forma:

MOD1: Este modelo apresenta ótimos valores dimensionais calculados para o vão de porta, mas péssimos resultados globais, ou seja, este modelo mostrou-se incapaz de prever diversas não conformidades (algumas graves) ao longo da linha de *matching* da porta até zona superior da janela lateral (sem contar outras diversas não conformidades graves que não foram apresentadas neste trabalho). Em linhas gerais, este modelo foi apenas desenvolvido e utilizado (segundo a geometria CAD original de estilo) para a validação do plano de método de estampagem inicial. Tinha somente a função de verificar a estampabilidade de forma geral do componente, e não prever graves problemas de geometria ou de superfície a peça. Portanto, é um modelo descartado.

FER1: Este primeiro modelo de simulação, com a superfície matematicamente gerada a partir da superfície física “real” do estampo construído, apresentou ótima convergência com a peça “real” estampada para o primeiro tryout deste ferramental. Este modelo, uma vez calibrado e ajustado com o modelo da superfície do estampo digitalizado, passou a ser a referência base para a análise das propostas ao tryout, de forma a verificar-se sua viabilidade ou não, antes de serem inseridas

“por tentativa e erro” por parte da ferramentaria. É um modelo base que, se confrontado com os resultados obtidos com o modelo FER2 (modelo dimensional) na Tabela 12(a) e (b), notamos o quanto se aproximam os valores, sendo estes também bastante divergentes em relação aos valores do MOD1, o que já era de se esperar.

FER2: O modelo FER2, ou seja, é o modelo que representa a variação dimensional do componente “físico” posicionado em condição de “veículo”. Este modelo é muito importante porque é o modelo que dá o direcionamento ao “*looping*”, ou seja, é o modelo que diz o quanto converge ou diverge o modelo FER’n’ simulado utilizando-se do MEF e se este último pode ou não ser considerado útil ao tryout ou não.

FER3: Novamente tal como o modelo FER1, este modelo incorpora já a superfície onde o tryout ao modelo FER2 fora executado. Neste modelo, podemos verificar a eficácia global dos resultados e compará-los com o modelo FER4, ou seja, a peça física “real” estampada apos o 2. tryout.

FER4: A análise deste modelo demonstrou ser de extrema significado, visto que nesta fase ou neste modelo se confirma a convergência dos dados (condições de contorno e geometria da superfície do estampo digitalizada).

No nosso estudo de caso, ao se observar a Tabela 12, verificamos um fenômeno interessante: O modelo MOD1 expressa *tudo OK*, pode-se construir o estampo. Mas, ao construirmos e colocarmos este em tryout, verificamos que não é bem assim; o resultado é outro, confirmado pelo modelo FER2 e certificado demonstrando que não atinge aos objetivos pelo modelo FER1. Ou seja, observando-se a Tabela 12, verificamos a dispersão entre MOD1 e FER1/FER2, mas a convergência de FER1 e FER2. Em outras palavras, o estampo foi inicialmente aprovado, mas, ao se produzir a primeira peça, verifica-se que o mesmo não apresenta conformidade, o que pode ser confirmado por uma simulação pelo MEF (FER1).

Entretanto, ao se observar agora na mesma Tabela 12 (d) e (e) os modelos FER 3 e FER4, verifica-se a plena convergência entre estes modelos, ou seja, a simulação confirma 100% de efetividade do tryout executado com relação aos problemas relevados, analisados e simulados nos modelos FER1 e FER2. Olhando-se os dados, observa-se o quanto estes convergem otimamente, em relação aos seus pares precedentes. Esse era o resultado que se esperava obter: a cada passo sucessivo um incremento de melhoria qualitativa significativa. Em resumo, partiu-se de uma base errada de construção (MOD1), confirmou-se, analisou-se e foram executadas simulações para retomar-se a linha de tryout (FER1 e FER2); executou-se um novo *looping* de tryout e confirmou-se a linha em FER3 e FER4.

7.7 Continuação do Tryout – Análise da necessidade de outros Modelos FER'n'

Em termos gerais, para o problema proposto neste estudo de caso, bastariam ao tryout da zona indicada na Figura 7.8 (pontos de 1 a 16) os modelos aqui apresentados, ou seja, não seria necessária a realização de um modelo FER5 e FER6, ou em termos gerais, um novo modelo FER'n', tal como indicado no diagrama de fluxo da Figura 7.2. Porém, para este modelo ainda foi realizada outra análise da parte anterior: a região em discussão foi parcialmente digitalizada e simulada pelo MEF; porém, não será tratada neste estudo de caso.

Em termos gerais, conclui-se a análise e tryout geral deste componente com praticamente três fases de tryout distintas e três modelos de simulação baseados no MEF, com diversas variantes estudadas (ver Capítulo 9).

8 CONCLUSÕES

Para se ter uma ideia da dificuldade de tryout de um ferramental de estampo ou do tempo que se leva para atingir a maturidade dimensional das peças principais (aprovação final da peça sob aspectos de qualidade final ao cliente) que compõem uma carroceria automotiva, o painel lateral, que pode ser considerado um dos componentes mais complexo deste sistema, leva segundo a experiência do mercado automobilístico do início do tryout até o atingimento dos objetivos de qualidade cerca de 32 semanas de tryout (cerca 8 meses). Esse tempo compreende desde o primeiro ajuste punção e matriz, passando pela primeira peça estampada até inúmeras análises (“*loopings*” de melhorias e correções) deste componente, até chegar ao resultado final. Obviamente este tempo é ainda muito alto para os atuais objetivos e estratégias globais, sem contar todos os custos que envolvem o desenvolvimento desta atividade.

No método desenvolvido e apresentado com este trabalho, uma nova porta se abre na direção de reduzir não só o tempo de “Time-to-Market” que como já explicado e comentado no capítulo inicial deste trabalho e também em [2], mas também de apresentar uma nova técnica capaz de reduzir os custos e ainda mais, que sirva de instrumento captador de “know-how” prático, que como já visto e discutido, experiência prática que possa ser utilizado como uma engenharia reversa no desenvolvimento dos planos de métodos de estamparia, e que por sua vez venham a reduzir a carga de tryout e/ou de interventor necessários aos estampos.

O não atingimento dos objetivos de um estampo em termos qualitativos, de forma que este seja em grado de satisfazer as expectativas do cliente, pode inclusive atrasar todo um programa de lançamento do veículo correlato, com consequências desastrosas em termos financeiros e imagem para a empresa.

Na figura 9-1 se verifica o cronograma de atividades para o desenvolvimento das atividades expostas no capítulo 7. A atividade de tryout normalmente executada em condições normais de desenvolvimento de ferramental para um conjunto de estampos de uma lateral automotiva considerando-se o trabalho de um grupo de 4 ferramenteiros experientes são cerca 32 semanas (ou seja são 32 semanas para obter-se a primeira peça dentro das condições de qualidade

requeridas ao projeto em termos dimensionais. Se deve ressaltar que a questão de qualidade da superfície da peça pode requerer ainda alguns interventor de tryout considerados cosméticos. Este tryout cosmético não será considerado nas conclusões deste trabalho.

Figura 9-1: Cronograma de acompanhamento e implementação de atividades de tryout de um estampo de uma lateral automotiva: na parte alta cronograma identificamos as 32 semanas do período de atividades correlatas ao tryout. Na parte baixa se identifica as atividades relacionadas ao procedimento descrito neste trabalho. Como resultado, se verifica uma redução de 9 semanas no tempo total de tryout.

Comparando-se os cronogramas entre as condições normais de tryout executadas como pratica normais na maior partes dos fabricantes (32 semanas como tempo mínimo de tryout) e o tryout onde engenharia reversa foi aplicada com sucesso realizando-se simulações de estampagem baseadas na aplicação do método dos elementos finitos em modelos construídos a partir dos dados da superfície digitalizadas dos estampos, se verifica uma redução de cerca 9 semanas na atividade, até a aprovação final deste componente em termos de qualidade dimensional. O período de atividade relacionada a aplicação desta técnica (ou seja a aplicação metodológica proposta) compreende um período de 7 semanas.

Como resultado desta aplicação, se verifica que se reduz de 1 “*looping*” de tryout em relação ao modo tradicional, porém se verifica também que o tempo dos sucessivos tryouts diminui consideravelmente, em média passa de 3 a 2 semanas. Esta redução no tryout se justifica no fato que a sistemática de “tentativa e erro” foi praticamente eliminada através da modelagem da superfície real do estampo, permitindo aos experts de estampagem de focalizar problema-solução diretamente, intervindo nas áreas onde realmente se tem uma necessidade física e onde porta-se um resultado em termos geométricos ou superfície (rugas e deformações). Uma vez que os ferramenteiros conhecem os pontos críticos de um estampo, não mais sendo necessário aplicar a “tentativa e erro” para se verificar os pontos de contato, não contato ou de interferência no estampo entre matriz e punção, ou executar diversas tentativas de estampar peças em varias condições de parâmetros para se determinar parâmetros ou aperfeiçoar o escoamento de material, induzindo por muitas vezes a erros irreparáveis, necessitando recobrir o estampo com solda e refazer a superfície do mesmo devido ao erro cometido. Com as ferramentas de engenharia reversas disponíveis, a precisão e confiabilidade dos resultados permite aos engenheiros e ferramenteiros tomarem decisões muito mais precisas em uma janela de tempo muito reduzida. Com isso se pode trabalhar em certas fases de tryout com atividades de análise e implementação de soluções em *overlapping*, ou seja em sobreposição de atividades. Com isso, se consegue reduzir o tempo de tryout em cada fase de 3 a 2 semanas em media.

A tabela 16 demonstra um resumo do impacto destas 9 semanas na atividade de tryout em termos de resultados ao programa de lançamento deste veículo. Como já visto em [2], a redução destas 9 semanas traz ao programa de tryout da lateral cerca **€275.244,00** de redução de custo ao tryout em relação ao método tradicional por cada ferramenta de lateral. Na tabela se verificam também os valores gastos para a construção e desenvolvimento dos modelos de engenharia reversa. Para cada fase (FER1/FER3) foram executadas 5 rotinas de simulações para verificar-se a viabilidade das propostas aos problemas e não conformidades de tryout. Os custos de FER2 e FER4 não são levados em consideração neste calculo por tratar-se de custos já embutidos no custo total do estampo (custos de qualidade). Porém em termos estratégicos, o ganho mais significativo esta na redução das 9 semanas de tryout ao cronograma original. Em termos de visão estratégica corporativa, lançar um veículo com 9 semanas de antecipação pode significar uma diferença de mercado em cerca 170 veículos a mais ao plano de produção.

Custo Total de um jogo de estampos por lateral	3.9 Mi/€
Custo de mão de obra de tryout de Ferramentaria	€84,00 /hora
Custo de mão de obra ao tryout (4 ferramenteiros/1 semana/ 2 turnos)	32.256,00 €/semana
Redução de custo no tryout de 1 conjunto de estampos de 1 lateral utilizando-se a metodologia proposta (considerando-se -9 semanas)	€290.304,00
Custo médio de digitalização da superfície do estampo de 1. repuxo (20 horas de atividade para digitalização e preparação dos dados)	€1.480,00 x 2 (FER1 / FER3) = (-) €2.960,00
Custo médio de cada simulação MEF (FER1/FER3) com 5 variantes geométricas do modelo (propostas) calculadas em cada fase	€1.110,00 /variante modelo por 10 modelos: (-) €11.100,00
Total de redução de custo ao tryout:	€275.244,00

Tabela 16: Panorama geral da redução de custos a atividade de engenharia reversa. Valores em Euros [€].

Estes veículos podem significar uma apresentação a imprensa antecipada e também podem significar uma vantagem corporativa perante a um cronograma de lançamento de uma casa concorrente (imagem), sem contar que livramos capacidade disponível para um outro programa de lançamento (aumentamos a capacidade disponível do corpo técnico a solução de problemas e novos produtos). Em termos de custos indiretos, o processo se demonstra extremamente vantajoso.

Visto de forma geral, a aplicação desta técnica se faz extremamente interessante se considerado a redução de forma geral do tryout para as peças mais críticas de um veículo como um todo, ou seja, a direta aplicação desta técnica em painéis de portas, tampa traseira e longarinas, que são as partes estampadas mais críticas de um veículo em desenvolvimento de um novo veículo e seus ferramentais de estampagem, [9][13][31] e [39].

Em termos futuros, a linha de trabalho para se aperfeiçoar ainda mais o tempo de aplicação desta técnica será o desenvolvimento e aplicação de métodos de simulação CAD de forma a substituir o Meisterbock físico por um modelo digital, ou seja, o próprio confronto digital da simulação e dos dados físicos em relação ao modelo FER2 e FER4 (que poderão ser digitalizados em termos de superfície e carregados no sistema CAD) em um ambiente virtual.

REFERÊNCIAS

- [1] ALLES über die Karosserie. *Motor Spezial*, Motor Presse Stuttgart, 1994.
- [2] WESTER H. *Journal European Automotive News*“, v.2, 2008, pg.13
- [3] RECKE, L.; SCHMIDT H. *Simulation blechumformung als integriertes werkzeug in der prozesskette karossérie*. T.C. Vu. München, VDI Report Nr.1153, 1994.
- [4] DAMOULIS, G. L.; BATALHA, G.F. & SCHWARZWALD, R.C. New trends in computer simulation as integrated tool for automotive components development. In: GHOSH, S.; CASTRO, J.M.; LEE, J.K. (eds). *Proceedings of NUMIFORM 2004*. Columbus, 2004. v. 1. p. 2103-2106.
- [5] HEIMERDINGER, E.; POLLMAN, W. & THOMS, V. Computerunterstützte technologien in der blechumformung. *VDI-Z*, v. 133, n. 4, p. 74-80, 1991.
- [6] PROZESSBEDINGUNGEN Optimierung. *Maschinenmarkt*, Würzburg, Nr. 97, pg. 28-33, 1996.
- [7] BARTI, M. Chancen und risiken bei theoretischen auslegung von methodenplänen in der blechumformung. VDI-Tagung “Blech Umformung” ; Wolfsburg, 1995.
- [8] KAWKA, M. Simulating manufacturing processes. *Automotive Engineering*, p. 31-33, April 1996.
- [9] DAMOULIS, G.L.; GOMES, E. & BATALHA, G. F. New trends in sheet metal forming analysis and optimization trough the use of optical measurement technology to control springback. *International Journal of Material Forming*, v.3, n.1, March 2010.
- [10] DAMOULIS, G.L.; BATALHA, G. F.; GOMES, E. Analysis of the industrial sheet metal forming process using the Forming Limit Diagram (CLC) trough computer simulation as integrated tool in the car body development. In: COBEF, 4., 2007, Estância de São Pedro. *Anais*. ABCM, 2006.
- [11] DAMOULIS, G.L.; BATALHA, G. F. Development of industrial sheet metal forming process using computer simulation as integrated tool in the car body development. In: COBEF, 2., 2003, Uberlândia. *Anais*. ABCM, 2003.
- [12] GALANULIS, K. Optical measuring technologies in sheet metal processing. *GOM Gesellschaft für Optische Messtechnik GmbH*, Alemanha, 2006.

- [13] DAMOULIS, G.L.; GOMES, E.; BATALHA, G. F. Combined finite element: forming limit diagram methodology for the development of automotive body stamped parts. *Int. Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems*, v. 1, n. 2/3, p. 264-281, 2007.
- [14] THEMA Simulation. Revista GMD Spigel, Ausgabe (edição) 3-4, p. 9-29, 2007.
- [15] Apontamentos de Aula (Lehrunterlagen), Universidade Técnica Chemnitz, Maschinenbauwesen, Betriebswirtschaft (Construção de Maquinas), 2006.
- [16] GALANULIS, K. Optical measuring technologies in sheet metal processing. *GOM Gesellschaft für Optische Messtechnik GmbH*, 2007 .
- [17] SCHMIEDT, T.; TYSON, J.; GALANULIS, K. Total area strain mapping improves total quality of stampings. *GOM - Gesellschaft für Optische Messtechnik GmbH*, 2006.
- [18] BEHRING, D.; THESING, J.; BECKER, H.; ZOBEL, R. Optical coordinate measuring techniques for the determination and visualization of 3D displacements in crash investigations. *GOM - Gesellschaft für Optische Messtechnik GmbH*, 2006.
- [19] DAMOULIS, G.L.; BATALHA, G.F. Development of industrial sheet metal forming process using computer simulation as integrated tool in the car body development. *Science & Engineering Journal*, v. 13, p. 33-39, 2004.
- [20] HAUG, E. ; PASCALE, E.D.I.; PICKETT, A .K.; ULRICH, D. Industrial sheet metal forming simulation using explicit FEM. *VDI Bericht*, n. 894, 1991.
- [21] BATALHA, G.F. & STIPKOVIC FILHO, M. Quantitative characterization of the surface topography of cold rolled sheets – new approaches and possibilities. *J. Mat. Proc. Technology*, v. 113, p. 732-8, 2001.
- [22] BATALHA, G.F. & STIPKOVIC FILHO, M. Estimation of the contact conditions and its influences on the interface friction in forming processes. In: PIETRZYK, M. et al. (eds). METAL FORMING 2000, 7. Krakow, 2000. *Proceedings*. p. 71-77.
- [23] DAMOULIS, G.L.; GOMES, E.; BATALHA, G.F. The industrial sheet metal forming process using the Forming Limit Diagram (CLC) through computer simulation as integrated in car body development. *Int. Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems*, v.1, n. 2/3, p. 264-81, 2007.
- [24] HEATH A.N.; PICKETT A.K.; ULRICH, D. Development of industrial sheet metal forming process using computer simulation. In: DEDICATED CONFERENCE ON LEAN

- MANUFACTURING IN AUTOMOTIVE INDUSTRIES, Aachen, Germany, 1993. *Proceedings*. 1993.
- [25] HAUG E.; PASCALE E.DI; PICKETT A.K.; ULRICH, D. ESI: Industrial sheet metal forming simulation using explicit FE-methods. *VDI Bericht* , n. 894, 1991.
- [26] HILL, R. Constitutive modeling orthotropic plasticity in sheet metals. *J. Mech. Phys. Solids*, v. 38, n. 3, p. 405, p. 405-17, 1990.
- [27] BATALHA, G. F.; STIPKOVIC FILHO, M. Estimation of the contact conditions and its influences on the interface friction in forming processes. In: PIETRZYK, M. ET AL. (ed.) METAL FORMING 2000. Rotterdam: Balkema 2000, p. 71-77.
- [28] AZUSHIMA, A.; MIYAMOTO, J.; KUDO, H.; Effect of surface topography of workpiece on pressure dependence of coefficient of friction in sheet metal forming. *Annals of the CIRP*, v. 47, n. 1, p. 479-482, 1997.
- [29] KITNER, KEI; Abgleich zwischen Simulation und Praxis bei der Umformung von Karosseriebauteile; Diplomarbeit, Universitaet Chemnitz; 2004;
- [30] BATALHA, G. F. & STIPKOVIC FILHO, M. Quantitative characterization of the surface topography of cold rolled sheets – new approaches and possibilities. *J. Material Processing Technology*, v. 113, p. 732-738, 2001.
- [31] DAMOULIS, G. L. *Desenvolvimento de processos de conformação de chapas usando simulação computacional como ferramenta integrada no desenvolvimento de carrocerias automotivas*. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Mecatrônica e de sistemas Mecânicos, 2005.
- [32] JOSHI, A. M. Strain studies in sheet metal stamping. *B.E Mechanical*, A.M.I. Prod. 2001.
- [33] HOSFORD, W.F.; CADDELL, R.M. *Metal forming – mechanics and metallurgy*. Prentice Hall, 2006.
- [34] TAYLOR, B. Formability Testing of Sheet Metals. In: ASM Metals Handbook, 9th Ed.
- [35] KEELER, S. P. Determination of forming limits in automotive stampings. *Sheet Metal Industries*, p. 357 – 361, 364. September 1965.
- [36] KEELER, S. P. Circular grid system – a valuable aid for evaluating sheet metal formability. *Sheet Metal Industries*, 45, 1967.
- [37] GOODWIN, G. M. Application of strain analysis to sheet metal forming problems in the press shop. *La Metalurgia Italiana*, n. 8, p. 767 - 774, 1967.

- [38] QUAN S.; NING X.; CHI Z. – Develop a Robot-Aided Area Sensing System for 3D Shape Inspection; Journal of Manufacturing Science and Engineering, February 2010, Vol. 132 / 014502-1
- [39] DAMOULIS, G; GOMES, E., BATALHA, G.F. New trends in sheet metal forming analysis and optimization through the use of optical measurement technology to control spring back, International Journal of Material Forming, 2009, p. 89-98, SPRING VERLAG.

Apêndice 1

A1. Propriedades Mecânicas dos Materiais.

A1.1 Materiais aplicados na conformação de componentes Automotivos

Nos dias de hoje, nas construções automobilísticas normalmente verifica-se o emprego de diversos materiais de construção mecânica, onde devido as necessidades de aplicação, que possam seguir e superar normas e requisitos de colisão e proteção aos ocupantes, peso, rigidez e conformabilidade. No utilize estrutural verifica-se principalmente o emprego de aços e alumínio, que podem ser utilizados em parte como “Tailored Blanks” ou blanks construídos sob medida (Damoulis 1997/2005).

Entre aqueles desafios reconhecidos naturalmente está a necessidade para o desenvolvimento de novos aços e revestimentos, para ir ao encontro das exigências de maior durabilidade, além de recursos avançados quanto à proteção da corrosão e do peso reduzido. Dependentemente a função que deve exercer o componente, o material deste deve ser previamente definido na fase de projeto e desenvolvimento. Estruturas que deve ser relevantes quanto a impacto estrutural (*crash*) são principalmente constituídos de aços de alta resistência, componentes que constituem a estrutura “casca” externa da carroceria são aços de baixa liga com propriedades específicas. A pressão para reduzir o consumo de combustível no projeto do veículo e a competição com novos materiais, principalmente o alumínio, foram as forças impulsionadoras por detrás do desenvolvimento do aço de alta resistência (HSS) . As propriedades do HSS possibilitam bitolas mais finas para serem aplicadas em todo o corpo do veículo, proporcionando um veículo mais forte e mais leve sem alterações significantes no custo da estrutura. A alta exigência e a concorrência com o alumínio fez com que nos últimos anos as indústrias de aço desenvolvessem produtos específicos, uma linha de aços especiais que pudessem obter propriedades especiais tanto quanto em função da sua resistência quanto da sua conformabilidade mecânica. Por exemplo, aqui podemos citar os aços microligados, os aços Dual-Phase (também conhecidos como aços bifásicos) ou os aços tipo Bake-Hardening.

Os aços microligados apresentam-se como uma estrutura com baixo valor de carbono, com adição de titânio (Ti), nióbio (Nb) ou vanádio (V), conferindo assim a formação de uma liga com características de uma boa conformabilidade com uma ótima resistência mecânica, onde cada elemento adicionado apresenta uma aplicação mais adequada. Denominados como aços de alta resistência e baixa liga (ARBL), eles são constituídos por um grupo específico de aços com composições químicas especialmente desenvolvidas para que se alcance elevados valores de propriedades mecânicas.

Os aços Dual-Phase (ou bifásicos) possuem uma liga onde se verifica a presença de martensita e ferrita. A parte ferrítica garante uma boa conformabilidade, e a martensítica, presente entre 5-15% na liga, age de forma a garantir uma boa estampabilidade. Mesmo possuindo a taxa inicial de encruamento por deformação muito alta, essa permite, entretanto de distribuir mais uniformemente as tensões e deformações por toda a superfície do componente, facilitando assim a estampabilidade e diminuindo a possibilidade de escoamento localizada (*necking*).

Os aços *Bake-Hardening* (BH) se caracterizam por um acréscimo da tensão limite de escoamento (de aprox. 40 MPa) durante o processo de tratamento de recobrimento ou pintura (a uma temperatura de aproximadamente 170°C). A tabela 5 apresenta uma variada escolha de aços significativamente utilizados na indústria automobilística mundial, representados segundo a norma DIN EN 10142.

<i>Referência segundo a norma DIN EN 10142</i>	<i>Observação</i>	<i>Tensão Limite Escoamento R_{esc}</i> $[N/mm^2]$	<i>Tensão Limite Ruptura a Tração R_m</i> $[N/mm^2]$
<i>Aços de baixa liga</i>			
DX53D Z	Repuxo Profundo	140-260	270-380
DX54D Z	Repuxo Extra-Profundo	140-220	270-350
DX56D Z	Repuxo Extra-Profundo	120-180	270-350
DX53D ZF	Repuxo Extra-Profundo	120-180	270-350
<i>Aços fosforizados / Aços Microligados</i>			
H220PD Z	-	220-280	340-400
H260LAD Z	-	260-330	350-430
H260LAD ZF	-	260-330	350-430
H260PD Z	-	260-320	380-440
H300LAD Z	-	300-380	380-480
H300PD Z	-	300-360	400-480
H340LAD Z	-	340-420	410-510
<i>Aços "Bake-Hardening"</i>			
H180B	-	180-240	300-380
H300B	-	300-360	400-480
<i>Aços bifásicos ou Dual-phase</i>			
H300X	-	300-340	450-510
H340X	-	240-380	570-620
P – Fosforizado LA – "Low Alloy" ou baixa liga D – Aços recobertos por imersão (Zincado a fogo) Z – Zincado (eletrolítico) ZF – Ferro-Zinco D – Aço para conformação a frio BH – "Bake-Hardening" X – Aços Bifásicos ou Aços "Dual-Phase"			

Tabela A1: Aços típicos utilizados na indústria automobilística mundial (standard de mercado), segundo a norma DIN EN 10142. Os materiais representados com a faixa cinza foram utilizados como referências para este trabalho.

A2. Seleção de materiais em Comparação com a prática vs. Simulação computacional

Para o desenvolvimento deste trabalho, foram apontados diversos materiais, entre os quais foram escolhidos com os materiais DX56D e H340X. O material DX56D é um aço de baixa liga com cobertura zincada, especialmente desenvolvida para estampagem de chapas finas. O aço H340X é um aço de alta resistência, também com cobertura zincada, utilizado em componentes estruturais ou componentes relevantes a teste de colisão (crash). Ambos os materiais correspondem ao standard normal de mercado (ilustrado na tabela 5), com todos os dados disponíveis para o cálculo das simulações em um banco de dados de materiais. Ainda, para ambos estes materiais foram efetuados provas experimentais em laboratório, de forma a relevar as propriedades destes com precisão, tais como curvas de escoamento, curva limite de conformação (CLC), anisotropia e coeficiente de encruamento, dados estes de relevância para as simulações. Ainda para o material DX56D, o valor da anisotropia normal deste material encontrado experimentalmente, demonstra-se relativamente alto em comparação aos dados do banco de dados standard. Segundo a definição de anisotropia, este material inclina-se a haver uma redução de espessura de chapa maior a aquela esperada. Essa redução já era previsível na simulação, onde na tabela 7 verifica-se a diferença entre os dados teóricos e os dados práticos experimentais do laboratório de chapas. Ainda, o material experimental demonstra uma curva de escoamento real muito mais plana em relação ao material standard, figura 19. Com isso, significa que já em certos níveis baixos de tensão, o material inicia o escoamento. Com isso define-se que a força no punção para o material experimental será mais baixa do que para o material padrão. Na figura 20 temos a representação da curva limite de conformação (CLC) para o material experimental em relação ao teórico, onde se verifica um deslocamento entre ambas as curvas. No material experimental, as deformações planares em relação ao material standard fazem com que ocorra este “off-set” entre ambas as curvas, tornando esta experimental mais “plana” em relação ao standard. Com essa análise entre os parâmetros, o processo de conformação será com o utilizo do material experimental muito mais avaliado qualitativamente e criticamente em relação ao material standard. Também, a condição geométrica do componente certamente no utilizo do material experimental muda em relação àquele standard, onde a relação entre cada um dos fatores passa a contar, principalmente em relação aos valores de anisotropia entre estes materiais. A condição geométrica da ferramenta

é também diretamente um fator determinante para o grau de conformação deste componente, e demonstra para a condição experimental um maior escoamento da chapa ao interno do estampo em relação ao teórico.

	<i>Material Standard DX56D</i>	<i>Material Experimental DX56D</i>
$n (0^\circ)$	0,23	0,231
$n (45^\circ)$	0,21	0,228
$n (90^\circ)$	0,22	0,23
$r (0^\circ)$	1,73	2,434
$r (45^\circ)$	1,49	2,3
$r (90^\circ)$	2,37	2,366
r_m	1,77	2,35
$R_{esc} (0^\circ) [N/mm^2]$	148,3	157,7
$R_{esc} (45^\circ) [N/mm^2]$	156,8	157,5
$R_{esc} (90^\circ) [N/mm^2]$	154	157,1
$R_m (0^\circ) [N/mm^2]$	322,4	287,5
$R_m (45^\circ) [N/mm^2]$	327,6	288,2
$R_m (90^\circ) [N/mm^2]$	320	288,3

Tabela A2: Valores comparativos experimentais x standard para o material DX56D

Figura A-1: Curva de tensão de escoamento real em função da deformação verdadeira para o material experimental em comparação aos dados teóricos deste.

Verificando-se esta diferença entre os dados dos materiais experimentais e dos materiais Standards, se entende automaticamente sobre a importância destes valores na simulação, onde apenas variando-se a carga de aciaria ou apenas alterando-se certas condições de produção destes aços, se podem variar automaticamente os valores e propriedades mecânicas destes. Basta apenas inserir outros valores na simulação, e alteram-se automaticamente os resultados da simulação. Por isso é aconselhável sempre uma verificação do material de utilização, de forma a garantir sempre o estado qualitativo de fornecimento do material de produção, de forma a respeitar sempre o plano de fabricação. Recomenda-se cada vez que se efetuar uma comparação entre simulação e resultado prático obtido com o estampado, a realização de um ensaio de tração com uma amostra do material a ser estampado e a realização experimental de um diagrama CLC seguido de uma verificação deste.

Figura A-2: Diagrama Limite de Conformação para o material DX56D experimental em comparação aos dados teóricos deste.

	<i>Material Standard H340X</i>	<i>Material Experimental H340X</i>
$n (0^\circ)$	0,16	0,119
$n (45^\circ)$	0,16	0,078
$n (90^\circ)$	0,16	0,142
$r (0^\circ)$	0,83	0,878
$r (45^\circ)$	0,90	0,855
$r (90^\circ)$	1,05	0,851
r_m	0,92	0,86
$R_{esc} (0^\circ) [N/mm^2]$	328	399
$R_{esc} (45^\circ) [N/mm^2]$	330	401
$R_{esc} (90^\circ) [N/mm^2]$	331	398
$R_m (0^\circ) [N/mm^2]$	600	689
$R_m (45^\circ) [N/mm^2]$	601	690
$R_m (90^\circ) [N/mm^2]$	602	690

Tabela A3: Valores comparativos experimentais x standard para o material H340X

Figura A-3: Curva de tensão de escoamento real em função da deformação verdadeira para o material H340X experimental em comparação aos dados teóricos deste.

Figura A-4: Diagrama Limite de Conformação para o material H340X experimental em comparação aos dados teóricos deste.

Apêndice 2

Utilização do “*Meisterbock*” como instrumento integrado para análise dimensional

Conceito “*Meisterbock*”

No início dos anos 90, impulsionado pela competitividade industrial automobilística e pela corrida a qualidade total do produto, a AUDI AG na Alemanha iniciou o desenvolvimento de um meio auxiliar para a certificação dos componentes e suporte na fase de implementação projetual na armação da carroceria (start-up da instalação), que vem utilizado desde então como instrumento ou alavanca no processo de implementação de qualidade e de manufatura (armação e estamparia). Esse instrumento foi denominado “*Meisterbock*”, termo este que não é possível a sua tradução para outro idioma.

Com o “*Meisterbock Carroceria*” (figura 1, representação em CAD virtual e figura 2 *Meisterbock* físico), reproduz-se fielmente o processo de armação da carroceria, onde as referências de construção entre este meio e o processo são idênticas. Este instrumento é construído de tal forma que partindo do pressuposto que minha plataforma é perfeita (existe também o *Meisterbock* da plataforma, mas este não será considerado no desenvolvimento deste trabalho, porém a técnica aqui apresentada pode ser também aplicada a este meio). O *Meisterbock* é mais do que um meio auxiliar. É um elemento que faz mover uma filosofia de trabalho, que tem como objetivo agilizar o start-up da produção, melhorar a qualidade e principalmente reduzir custos e passos de melhoramento ou de reentro da conformidade geométrica das peças.

Hoje em dia, através dos chamados “*Meisterböcke*”, ou seja, tal como a representação física na figura 8-9, é uma estrutura construída com perfis especiais, de forma a acolher as peças estampadas do veículo, sejam estas unitárias ou conjuntos soldados. Todo o conjunto é colocado sob uma máquina de medição por coordenadas MMC (condição normal de uso deste meio), mas pode ser utilizado também com laser de medição ou com equipamento fotogramétrico, como proposto neste trabalho.

Figura B-1: Representação esquemática em CAD de um Meisterbock Carroceria.

Esta estrutura, tal como representada na figura 8-10, possui todos os elementos de referência a construção ou armação da carroceria. No Meisterbock da carroceria, parte-se do pressuposto que a plataforma é “zero”, ou seja, não são erros de construção na plataforma, assim desta forma, se isola da cadeia de tolerâncias a influência da mesma. A plataforma pode ser trabalhada em outro Meisterbock, próprio para este fim, como já citado acima.

A estrutura é construída segundo o utilizzo de um sistema de coordenadas principais que chamaremos de local, com todos os pontos de referência para o posicionamento das laterais, portas, tampas e teto acoplado a este. O posicionamento físico do componente é chave fundamental para a análise dimensional das não conformidades geométricas dos componentes estampados que possam impedir a construção da carroceria ou de alguma forma impedir que esta possa desfrutar de plenas características de funcionamento (como por exemplo, abertura ou fechamento dificultoso das portas).

Figura B-2: Meisterbock físico da Carroceria montado com componentes da carroceria (laterais completas).

Nas figuras 8-10 e 8-11, podemos verificar a estrutura construtiva do sistema Meisterbock, seja em representação física construtiva (figura 8-11) ou em representação em CAD (figura 8-12). Os componentes são posicionados conforme o sistema de coordenadas do veículo, a partir do sistema de coordenadas global do veículo (zero inicial do sistema posicionado no centro do eixo dianteiro do veículo de acordo com convenção internacional SAE entre montadoras). Os componentes então são posicionados segundo o sistema RPS (*Referenz-Punkt-System* ou sistema de referência por pontos).

Seja o projeto dos componentes, seja o projeto da estrutura Meisterbock, seja o projeto da linha de armação, ou seja, a construção do estampo, todos devem obedecer a uma referência de construção e a uma referência (ou a um grupo destas) para poder ser posicionado corretamente no espaço. Hoje a maior parte dos construtores automobilísticos utilizam a norma ASME Y14.5M (1994) como base para a determinação dos “datum” ou referências de construção da estrutura carroceria dos veículos.

Figura B-3: Estrutura do Meisterbock físico da Carroceria.

Todos os processos de referenciamento do processo e produto são descritos com detalhes no “Apêndice A” desta tese. O Meisterbock é um meio que pode ser utilizado seja na fase inicial de construção do veículo ou apos inicio produção, quando será necessário manter o estado qualitativo da estrutura peças estampadas-carroceria deste. Quando se inicia a fase de construção de um veículo novo, ou seja, a fase em que as primeiras peças partem do tryout prático das ferramentas de estampagem, ou quando se inicia a soldar os primeiros grupos de armação, o Meisterbock torna-se peça fundamental na cadeia de melhoramento continuo da qualidade do produto e processo.

Figura B-4: Representação em CAD da estrutura do Meisterbock físico da Carroceria.

Tecnicamente o Meisterbock é um meio que já é disponível cerca de 3-4 meses antes do início do tryout da linha de armação ou tecnicamente disponível quando se estampa as primeiras peças de tryout. Cada nova peça/conjunto vem avaliada no Meisterbock, e após uma metódica análise seja essa dimensional (através de medidas obtidas com o braço de medição de uma máquina de medição por coordenadas MMC) ou através da análise de acoplamento entre duas peças estampadas ou de dois conjuntos soldados ou não, aonde o vão entre os mesmos pode ser medido e avaliado com um calibrador de lâminas espessuradas. Através destas análises, os engenheiros de manufatura, produto e qualidade assegurada, com estes valores em mão definem as correções que deverão ser executadas seja em nível de estampo (peças unitárias estampadas) ou em conjuntos estampados de armação.

Embora estas análises de condição geométrica destes componentes sejam precisas, muitas vezes os interventores a serem executados não portam o resultado esperado, ou seja, os interventores devem passar por muitas vezes por diversos “loopings” ou passagens de correções, até o reentorno das características geométricas deste. E isso porta às vezes a uma cronologia extremamente longa e a custos sem limite. Estes interventores em termos de ferramental de estampagem, podem inclusive portar a uma alteração inicial da geometria do estampo, recaindo no problema entre “prática x teoria”, onde o resultado final, por muitas vezes pode levar a modificações extremas na superfície de um estampo, tornado esse completamente fora de desenho. Caso seja necessária uma simulação de estampagem, será muito difícil reproduzir o resultado final, uma vez que houve uma descaracterização inicial da superfície da ferramenta de forma a obter-se o resultado esperado.

O Meisterbock deve então ser visto como um instrumento passivo, ou seja, somente capaz de dar uma resposta linear sobre um componente. Uma forte tendência para a aplicação das simulações computacionais em estampagem é a criação do chamado Meisterbock Digital. Fabricantes de automóveis procuram cada vez mais cedo simular seus processos de fabricação, procurando por pontos críticos nos seus produtos a fim de evitá-los quando da construção do ferramental para a produção destes. Porém muitas vezes, um problema ou certa ocorrência de qualidade somente é verificado ou evidenciado quando a peça estampada é avaliada pelas salas de medidas das fábricas, sendo por muitas vezes tarde demais, pois as ferramentas, conceitualmente já estão praticamente construídas e encontra-se na fase final de ajuste. Torções e retornos elásticos são problemas comuns encontrados hoje em peças de geometria complexa (carrocerias), sendo que muitos destes casos são de difícil solução e às vezes requerem total reestruturação do conceito da ferramenta. Em relação ao grau de maturidade de uma ferramenta de estampagem para a indústria automobilística, Meisterbocke são ferramentas indispensáveis ao desenvolvimento da construção do veículo, uma vez que simula a condição real de montagem da peça no dispositivo e sua influência final (comportamento) na carroceria do veículo.