

JANAÍNA GONÇALVES RODRIGUES



OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE PINTURA AUTOMOTIVA ATRAVÉS
DA METODOLOGIA OPERAÇÃO EVOLUTIVA (EVOP)

SÃO PAULO
2011

JANAÍNA GONÇALVES RODRIGUES

OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE PINTURA AUTOMOTIVA ATRAVÉS DA METODOLOGIA OPERAÇÃO EVOLUTIVA (EVOP)

Monografia apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do certificado de
Especialista em Gestão e Engenharia da
Qualidade – MBA / USP

Orientador:
Prof. Dr. Adherbal Caminada Netto

SÃO PAULO
2011

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha avó.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Adherbal Caminada Netto, orientador deste trabalho, por todo suporte, paciência, disponibilidade e amizade oferecidos durante a execução deste trabalho,

Aos queridos professores:

- Álvaro José de Almeida Calegare, principal responsável por meu interesse pelo tema desta monografia, pois foi durante suas inestimáveis aulas da disciplina GEQ013-Estatística Avançada que decidi desenvolver um trabalho utilizando ferramentas de delineamento de experimentos.
- Gilberto Francisco Martha de Souza por todos os ensinamentos e paciência ao passar os conhecimentos necessários.

Aos meus estimados colegas da empresa onde trabalho.

A Universidade de São Paulo que contribui com minha formação e crescimento desde 2000.

À minha família por todo apoio, carinho e amor presentes em todos os dias da minha vida.

*“Criatividade consiste no total rearranjo do
que sabemos com o objetivo de descobrir o
que não sabemos”
(George Kneller)*

RESUMO

Através de um estudo de caso, este trabalho apresenta a otimização do processo de pintura automotiva em uma montadora de automóveis, localizada no estado de São Paulo, utilizando a ferramenta estatística operação evolucionária. A escolha por esse método deve-se ao mesmo ser de fácil execução, uma vez que os experimentos podem ser realizados sem que haja perda de produção e qualidade. Após detalhamento e conhecimento de cada etapa de pintura automotiva, bem como apresentação da operação evolucionária, o processo escolhido para desenvolvimento do trabalho é a aplicação automática de base preta sólida. Os experimentos são feitos em um modelo específico e os fatores controláveis são pressão de ar de leque e vazão de base. Cada fator tem dois níveis de tratamento e os experimentos são realizados com cinco réplicas. A saída otimizada é o consumo de base e, ao realizar todos os testes planejados, observa-se que tanto o fator pressão como o fator vazão influenciam o processo ao nível de significância de 5%. Entretanto, não há interação significativa entre os mesmos. Além disso, observa-se que a metodologia operação evolucionária é realmente simples de ser utilizada e oferece grandes recompensas nas operações de pintura automotiva promovendo melhor entendimento do processo pelos colaboradores e permitindo melhoria contínua de cada etapa.

Palavras-chave: Pintura automotiva. Operação evolucionária. Aplicação de base.

ABSTRACT

Through a case study, this paper presents the optimization of automotive paint on a car assembly plant, located in São Paulo state, using the statistical tool evolutionary operation. This method choice is due to even be easy, since the experiments can be performed without loss of productivity and quality. After details of each step and knowledge of automotive paint and evolutionary operation's presentation, the process chosen for the development work is the automatic application of solid black basecoat. The experiments are done on a specific model and the controllable factors are fan air pressure and flow of basecoat. Each factor has two treatment levels and the experiments are performed with five replications. The output optimized is basecoat consumption and, to perform all planned tests, it observes that both the pressure factor as the flow factor influence the process at a significance level of 5%. However, there isn't significant interaction between them. Moreover, it is observed that the evolutionary operation method is really simple to use and offers great rewards in automotive paint operations promoting better understanding of the process employees and allowing continuous improvement of each step.

Keywords: Automotive paint. Evolutionary operation. Basecoat application.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Licenciamento de automóveis leves	13
Figura 2.1 – Camadas que compõem a pintura automotiva	18
Figura 2.2 – Foto microscópica da camada de fosfato	20
Figura 2.3 – Imersão de carroçaria no banho de <i>e-coat</i>	21
Figura 2.4 – Fenômenos ocorridos durante o processo de pintura eletroforética	22
Figura 2.5 – Esquema de Tratamento Superficial	23
Figura 2.6 – Pistola Convencional vs Pistola Eletrostática	25
Figura 2.7 – Exemplo de Robô utilizado na aplicação de <i>primer</i>	25
Figura 4.1 – Unidade gerencial da pintura da Alpha Cars do complexo A	33
Figura 4.2 – Mapa de processo – aplicação de base/verniz	34
Figura 4.3 – Máquina Sames	36
Figura 4.4 – Sino modelo EC65	37
Figura 4.5 – Estação de computadores para operação da Sames	37
Figura 4.6 – Esquematização da máquina Sames	40
Figura 4.7 – Ilustração de tabela de parâmetros	41
Figura 4.8 – Planejamento experimental do programa EVOP	42
Figura 4.9 – Cálculo da Soma dos Quadrados	45
Figura 4.10 – Tabela de Análise de Variância	46

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 4.1: Resíduos 50

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1: Delineamento de experimento para aplicação da base sólida preta	40
Tabela 4.2: Ensaios do programa EVOP para redução de consumo de base	43
Tabela 4.3: Resultados obtidos na execução dos cinco ciclos do experimento	44
Tabela 4.4: Análise de variância para otimização da aplicação de base preta	47
Tabela 4.5: Médias obtidas para cada combinação de tratamento	48
Tabela 4.6: Subtração entre resultados obtidos e resíduos encontrados na execução dos experimentos	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CLP	controlador lógico programável
DOE	<i>design of experiments</i>
E-Coat	<i>electrocoat</i>
EG	eletro-galvanizado
EVOP	<i>evolutionary operation</i>
HDG	<i>hot deep galvanized</i> (galvanizado a fogo)
L	litro
min	minuto
mL	mililitro
nm	nanômetro
PVC	cloreto de polivinila
UV	ultravioleta
vs	<i>versus</i>
µm	micrômetro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Considerações iniciais	13
1.2	Objetivo do trabalho	15
1.3	Organização do trabalho	16
2	PINTURA AUTOMOTIVA.....	18
2.1	Tratamento superficial.....	18
2.1.1	Fosfatização.....	19
2.1.2	Pintura eletroforética	21
2.1.3	Calafetação de painéis.....	23
2.1.4	Aplicação de <i>primer</i>.....	24
2.1.5	Aplicação de <i>top coat</i> (acabamento).....	26
2.1.6	Etapas de inspeção.....	27
3	OPERAÇÃO EVOLUTIVA (EVOP)	29
4	ESTUDO DE CASO	32
4.1	Caracterização da empresa.....	32
4.1.1	Departamento de pintura da Alpha Cars Complexo A	33
4.2	Processo otimizado	34
4.3	Planejamento	35
4.3.1	Condução do estudo de caso	35
4.3.2	Estrutura do processo	36
4.3.3	As variáveis do processo	38
4.3.4	Planejamento experimental.....	39
4.4	Resultados e discussão	44
4.4.1	Condução dos experimentos	44
4.4.2	Resultados obtidos	44
5	CONCLUSÃO E ESTUDOS FUTUROS	51
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53
	ANEXO A – Tabela de distribuição F de Snedecor.....	55

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

Este trabalho solidifica a formação da autora no que diz respeito ao aperfeiçoamento do sistema de aplicação de tintas na indústria automotiva.

O setor automobilístico brasileiro está passando por um ótimo momento de produtividade. Segundo dados da ANFAVEA (2011), houve aumento significativo do percentual de veículos leves produzidos ao longo do tempo, conforme apresentado na Figura 1.1.

Unidades Units / Unidades	2011			2010		Variações percentuais		
	FEV	JAN	JAN-FEV	FEV	JAN-FEV	Percent variations / Variaciones porcentuales		
	FEB/FEB A	JAN/JAN B	JAN-FEB / JAN-FEB C	FEB/FEB D	JAN-FEB / JAN-FEB E	A/B	A/D	C/E
Automóveis <i>Passenger cars / Automóviles</i>	202.156	180.609	382.765	168.591	327.885	11,9	19,9	16,7
Empresas associadas à Anfavea <i>Member companies / Empresas asociadas</i>	197.484	176.560	374.044	166.324	323.374	11,9	18,7	15,7
▶ Fiat	47.740	36.878	84.618	39.314	76.293	29,5	21,4	10,9
▶ Fiat	47.738	36.877	84.615	39.313	76.291	29,5	21,4	10,9
▶ Alfa Romeo	2	1	3	1	2	100,0	100,0	50,0
▶ Ford	18.339	17.663	36.002	18.670	36.250	3,8	-1,8	-0,7
▶ General Motors	39.074	34.578	73.652	35.058	71.583	13,0	11,5	2,9
▶ Honda	7.901	6.720	14.621	7.526	14.703	17,6	5,0	-0,6
▶ Hyundai	4.853	4.491	9.344	2.906	5.650	8,1	67,0	65,4
▶ Mercedes-Benz	553	397	950	370	705	39,3	49,5	34,8
▶ Mitsubishi	10	2	12	1	5	400,0	900,0	140,0
▶ Nissan	3.471	2.525	5.996	1.627	2.974	37,5	113,3	101,6
▶ Peugeot Citroën	13.473	12.164	25.637	10.363	19.940	10,8	30,0	28,6
▶ Peugeot	6.405	5.136	11.541	5.630	10.933	24,7	13,8	5,6
▶ Citroën	7.068	7.028	14.096	4.733	9.007	0,6	49,3	56,5
▶ Renault	12.028	10.418	22.446	8.805	16.376	15,5	36,6	37,1
▶ Toyota	4.043	3.489	7.532	3.794	7.095	15,9	6,6	6,2
▶ Toyota	4.043	3.487	7.530	3.794	7.095	15,9	6,6	6,1
▶ Lexus	0	2	2	0	0	0,0	-	-
▶ Volkswagen	45.999	47.235	93.234	37.890	71.800	-2,6	21,4	29,9
▶ Volkswagen	45.786	47.030	92.816	37.722	71.458	-2,6	21,4	29,9
▶ Audi	213	205	418	168	342	3,9	26,8	22,2
Outras empresas/Other companies/Otras empresas	4.672	4.049	8.721	2.267	4.511	15,4	106,1	93,3

Figura 1.1 – Licenciamento de automóveis leves

Fonte: ANFAVEA (2011)

Outro fator a ser considerado, é a disputa acirrada pelo mercado entre as montadoras. Manter produtividade alta aliada a excelência em qualidade e ao custo estrutural cada vez mais baixo é um desafio.

Levando em conta os grandes fabricantes (por ordem de vendas FIAT, Volkswagen, General Motors e Ford), esta tarefa é ainda mais complexa, pois os mesmos já possuem um sistema de gestão eficaz implantado e consolidado.

Nesse contexto, o cliente é o protagonista desta situação, pois é ele quem tem o poder inquestionável e absoluto de julgar um produto adquirido. No caso desse produto ser um automóvel, não é suficiente apenas o fato do carro atender todas as especificações de engenharia. O cliente almeja a satisfação de suas expectativas e necessidades. MURAD (2005) é enfático ao afirmar que:

Mesmo um produto estando dentro de suas especificações não quer dizer que ele atenda plenamente suas necessidades. A insatisfação dos clientes tem origem em deficiências, que são os motivos de reclamações. Deficiência em um veículo pode afetar os lucros, pois o cliente encontrando um defeito torna uma atitude que está relacionada a custos, registra uma reclamação, exige um reparo do produto, faz exigências e pode até mesmo abrir processos contra a empresa.

Deste modo a demanda por qualidade e confiabilidade dos produtos cresce continuamente e este fenômeno é mais perceptível no setor automobilístico.

Lembrando que hoje em dia existem fóruns de reclamações em meios eletrônicos onde a maioria das pessoas em nível mundial tem acesso.

Com isso, qualquer aperfeiçoamento de processo visando ganho em custo e manutenção/melhoria de qualidade, sem alterar a produtividade e superando a expectativa dos clientes, é extremamente válido.

Assim, desde sua admissão, em 2004, em uma Montadora, a autora do presente trabalho colabora na melhoria de aplicação de pintura automotiva, fazendo pequenos experimentos em linha. Entretanto, antes deste estudo nunca houve a preocupação com planejamento detalhado através da seleção de variáveis e análise mais minuciosa dos resultados obtidos. Somente eram avaliados os resultados técnicos e as saídas correspondentes a especificação de engenharia, desempenho de qualidade e custo do produto.

Com o conhecimento da ferramenta operação evolutiva (EVOP, que vem do inglês *evolutionary operation*), torna-se possível trabalhar com mais consistência nas melhorias do processo, uma vez que há planejamento metódico, seleção e escolha justificada de variáveis a serem estudadas e análise mais robusta dos resultados obtidos com tomada de decisão oportuna.

E esta ferramenta agrega valor em escala industrial onde há, também, preocupação com o fator produtividade. COSTA SOBRINHO (2002) ressalta em sua tese:

Já as condições ótimas de um processo em escala industrial podem ser alcançadas por meio da metodologia Operação Evolutiva ou EVOP (*Evolutionary Operation*); proposta por BOX (1957¹; 1998²) como um método para monitoramento e melhoria contínua de um processo em escala industrial através da alteração das condições de operação em direção a um valor ótimo. Esta metodologia utiliza experimentos em que os fatores são modificados cuidadosamente, de modo que não haja perda de produção ou condições de riscos para os equipamentos.

Deste modo, a autora apresenta, nesta monografia, uma proposta de otimização do processo de pintura automotiva através da metodologia EVOP, a fim de criar condições para melhoria da qualidade e custo do processo conferindo uma maior cientificidade a todo planejamento, escolha de fatores controláveis e análise dos resultados obtidos.

1.2 Objetivo do trabalho

A partir de pequenas mudanças no processo automatizado de pintura automotiva, pretende-se otimizar o processo de aplicação de tinta em determinada montadora, bem como a diminuição do consumo, ou seja, encontrar o equilíbrio necessário para uma excelente aplicação com o mínimo gasto necessário.

Para isso é utilizada a ferramenta EVOP. Esta metodologia é de simples execução e já há algum tempo, “simplicidade”, é algo extremamente importante e necessário no cotidiano de uma empresa de grande porte. Tudo o que é complexo, é

¹ BOX, G. E. P. Evolutionary operation: a method for increasing industrial productivity. **Applied Statistics**, 6, 81-101. 1957.

² BOX, G. E. P.; DRAPER, N. R. **Evolutionary operation – a statistical method for process improvement**. Wiley Classics Library Edition. New York, Wiley Interscience. 1998. 237p.

difícil planejar, realizar e acompanhar. CAMINADA NETTO (2006) concorda com esta colocação ao escrever:

Finalmente, mas nem por isso menos importante, é vital ter em mente, que tudo aquilo que, em última análise, se destina a ser utilizado no dia a dia das organizações deve ser simples. Simples de obter, simples de processar, simples de utilizar. Isto também é verdade para as medidas de avaliação. De outra forma, as pessoas, ocupadas como sempre estão, simplesmente as deixarão de lado.

1.3 Organização do trabalho

O presente trabalho é desenvolvido em uma montadora localizada no estado de São Paulo, no Departamento de Pintura de Carrocerias. A Empresa em questão produz 53 veículos por hora e o processo de Pintura Automotiva está dividido nas seguintes etapas: Fosfatização, Pintura Eletroforética, Aplicação de Primer, Base e Verniz e algumas fases de inspeção.

A etapa otimizada é a aplicação de base. Este é um processo quase 100% automatizado e, mesmo com uma espessura de camada de base que atende a especificação, é sabido que existem inúmeras oportunidades de melhoria na homogeneização da mesma.

Para isso é utilizada a metodologia Operação Evolutiva (EVOP), pois na montadora citada é altamente interessante a realização de vários experimentos que visam melhoria da qualidade sem que haja alteração na rotina de produção e perda de produtividade.

Para melhor apresentação o trabalho será dividido em cinco capítulos:

- **Introdução:** neste capítulo são feitas algumas considerações iniciais envolvendo a situação atual do setor automobilístico no que diz respeito à qualidade, custo, produtividade e volume de vendas, bem como a importância do principal bem das empresas: o Cliente. Em seguida mostra-se em poucas linhas o objetivo do estudo e, finalizando, a estrutura que o trabalho deve seguir.

- Pintura automotiva: este capítulo descreve todas as etapas da pintura de carroçaria, desde o tratamento superficial até a inspeção final, momento em que a unidade é liberada para a linha de montagem (tapeçaria e mecânica). Para melhor compreensão do processo, as etapas são ilustradas com figuras e fotos.

- EVOP: neste capítulo é abordado o tema Delineamento de Experimentos evidenciando seu histórico e sua utilidade e ganhos para melhoria contínua da qualidade dos produtos de uma empresa através de pequenos incrementos no processo.

- Estudo de caso: este é sem dúvida o capítulo mais denso da monografia. Descreve-se a empresa em que o trabalho é desenvolvido mostrando seus produtos, processos, sistemas de gestão seguidos entre outras informações. Em seguida, após apresentação do processo a ser otimizado, são detalhados o planejamento, os estudos, experimentos e resultados da operação evolutiva utilizada na etapa de aplicação de base no departamento de pintura de carroceria. Os experimentos são feitos nos parâmetros de aplicação da estação automática da tinta base, utilizando como entradas uma cor e um modelo específicos. São controlados dois fatores com dois níveis de tratamento cada e execução de cinco réplicas.

- Conclusão e estudos futuros: neste capítulo são consideradas as conclusões obtidas com o estudo de caso através da análise dos experimentos realizados. É feita uma análise crítica da ferramenta EVOP bem como planejamento de utilização desta metodologia para os demais processos da Pintura.

2 PINTURA AUTOMOTIVA

Devido à melhoria contínua dos sistemas de pintura ao longo dos anos, a pintura automotiva conta com processos similares nas montadoras de veículos em geral (FAZENDA, 2005). Além da beleza, a característica fundamental da pintura de um automóvel é a proteção anti-corrosiva do substrato metálico e a resistência química e física do acabamento.

Nos próximos itens são detalhadas todas as etapas de pintura automotiva, desde o tratamento superficial até o acabamento, para que seja compreendida a função de cada processo e camada de tinta existente em um automóvel, conforme ilustrado na Figura 2.1.

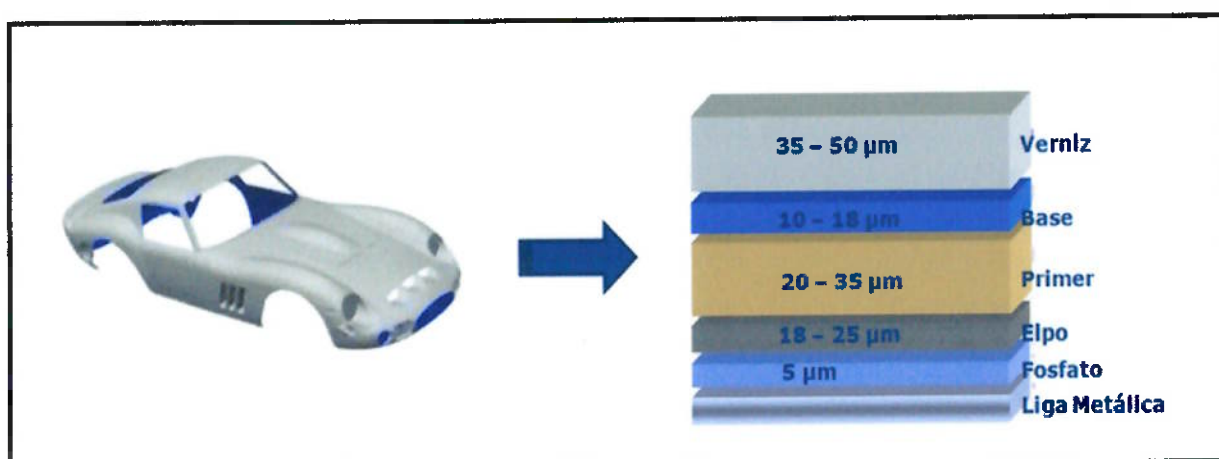


Figura 2.1 – Camadas que compõem a pintura automotiva

2.1 Tratamento superficial

O primeiro processo de pintura é o tratamento superficial da chapa. Os metais apresentam uma condição instável tendendo a mudar para uma condição estável através da formação de óxidos, hidróxidos, sais, etc. Dessa maneira, a corrosão é um processo natural que, para combatê-la, fazem-se necessárias algumas melhorias, tanto nas condições dos substratos metálicos como no processo de preparação dos mesmos para a pintura final.

Quanto aos tipos de metais utilizados, além do aço comum, há um aumento significativo do emprego de aço galvanizado nas formas de eletro-galvanizado (EG),

galvanizado a fogo (HDG, do inglês *hot deep galvanized*) e *galvaneal* visando aumentar a resistência à corrosão (FAZENDA, 2005).

As fases de preparação química do metal são detalhadas a seguir.

2.1.1 Fosfatização

No tratamento superficial das indústrias automobilísticas em geral o processo inicial chama-se fosfatização. Este processo é usado com finalidade de adequar a superfície metálica ao uso através da substituição da camada de ferro na superfície da chapa por metais mais resistentes a corrosão, tais como Zinco, Níquel e Manganês ligados ao íon fosfato, através de ataque ácido.

Normalmente, nas indústrias automotivas, é comum que, antes da carroçaria entrar no processo de fosfatização, haja uma primeira etapa chamada pré limpeza. Sua função é remover parcialmente os óleos e graxas da superfície metálica originados na estampagem dos painéis, bem como resíduos de colas metal e estrutural aplicadas na funilaria. Esta remoção é feita com aplicação manual de desengraxantes/detergentes.

Feito isso, para se obter uma camada de fosfato micro cristalina eficiente sobre o substrato, não se deve levar em consideração apenas a solução fosfatizante, mas sim alguns tratamentos prévios para garantir a total eliminação óxidos, óleos e sujeiras, garantindo uma superfície **perfeitamente** limpa e ativada para fosfatização. CHEMETALL [2003] descreve uma seqüência típica de um processo de fosfatização para posterior pintura engloba as seguintes fases:

- Desengraxe alcalino: feito por spray – imersão – spray tem ação mecânica e química, removendo totalmente qualquer tipo de óleo, tanto nas partes externas como nas internas da carroçaria;
- Lavagem com água potável: feita por spray é necessária para remoção do de resíduos alcalinos do estágio anterior evitando, desta forma, contaminação dos banhos das fases seguintes;
- Refino: feito por imersão prepara a superfície metálica a ser fosfatizada, evitando que ocorra formação de camada de fosfato irregular;

- Fosfatização (propriamente dita): feita por imersão – spray deposita uma camada de fosfato tri catiônico (zinco, níquel e manganês) firmemente aderido ao substrato preparando-o para receber revestimentos orgânicos, proporcionando melhor aderência e resistência à corrosão. Vide na Figura 2.2 imagem microscópica da camada de fosfato:

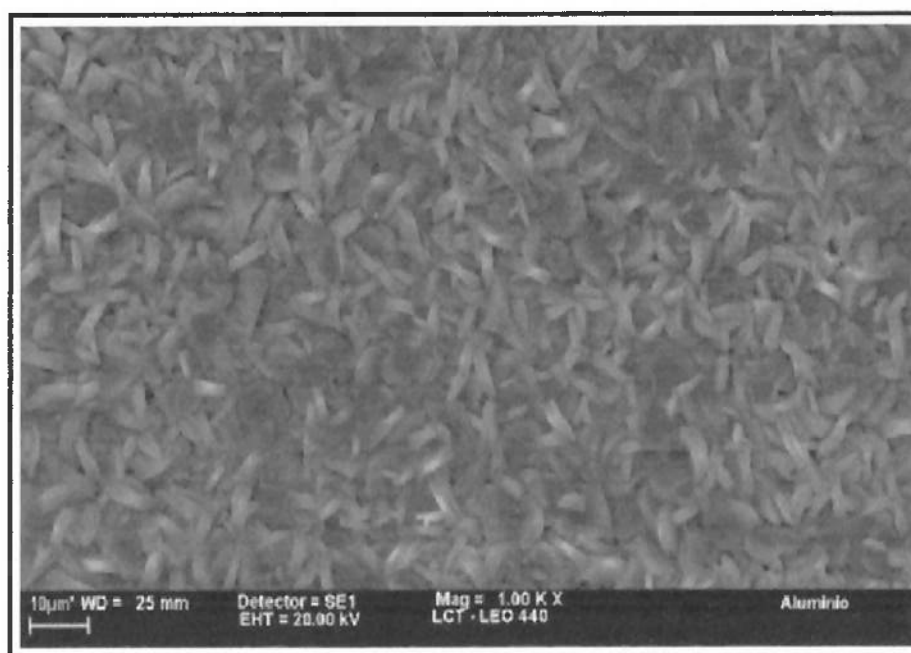


Figura 2.2 – Foto microscópica da camada de fosfato

Fonte: imagem gentilmente cedida pela Henkel

- Lavagem com água potável: feito por spray remove os sais residuais e acidez provenientes do estágio anterior evitando, desta forma, contaminação dos banhos das fases seguintes;
- Passivação: feita por spray cessa qualquer reação de fosfatização que por ventura possa estar ocorrendo e sela, ou seja, preenche os espaços existentes entre os cristais de fosfato;
- Lavagem com água deionizada: feita por spray – imersão – spray remove qualquer resíduo de sais gerados durante todo o processo para evitar formação de qualquer tipo de corrosão futura.

2.1.2 Pintura eletroforética

Complementando este tratamento anti-corrosivo, tem-se, logo após a fosfatização, a pintura eletroforética. Trata-se do primeiro revestimento orgânico, cujas funções primordiais são garantir a proteção à oxidação e promover aderência para as próximas camadas de tinta. Esse processo foi desenvolvido como método de pintura para atender aos requisitos anti-corrosivos exigidos pela indústria automobilística, de autopeças e de eletrodomésticos, sendo conhecido por vários nomes, por exemplo: *elpo*, *e-coat*, *electrodip*, *electropaint*, eletrodeposição, entre outros. Ela ocorre quando se mergulha um objeto metálico em um banho de tinta diluída em água, através da qual se faz passar uma corrente elétrica onde a carroçaria é conectada a um pólo e o tanque, através de eletrodos, a outro. Veja ilustração deste processo na Figura 2.3.



Figura 2.3 – Imersão de carroçaria no banho de e-coat

Fonte: imagem gentilmente cedida pela BASF

Pela teoria eletroquímica, quatro fenômenos ocorrem durante a pintura eletroforética. São:

- Eletrólise: fenômeno da reação de óxido-redução com separação de íons;

- Eletroforese: fenômeno de migração da partícula de pigmento, envolvida pela respectiva resina e demais componentes da tinta, em direção a carroçaria a ser pintada, quando a mesma é submetida a uma diferença de voltagem elétrica;
- Eletrocoagulação: fenômeno onde ocorre a aproximação do macro íon ao pólo contrário a sua carga provocando a adesão da partícula ao substrato possibilitando a formação de um filme de tinta insolúvel em meio aquoso;
- Eletroosmose: fenômeno de eliminação dos eletrólitos contidos no veículo da tinta aplicado, ou seja, o material eletro depositado perde quase toda a água.

Para ilustração dos mecanismos dos processos descritos acima, veja a ilustração da Figura 2.4:

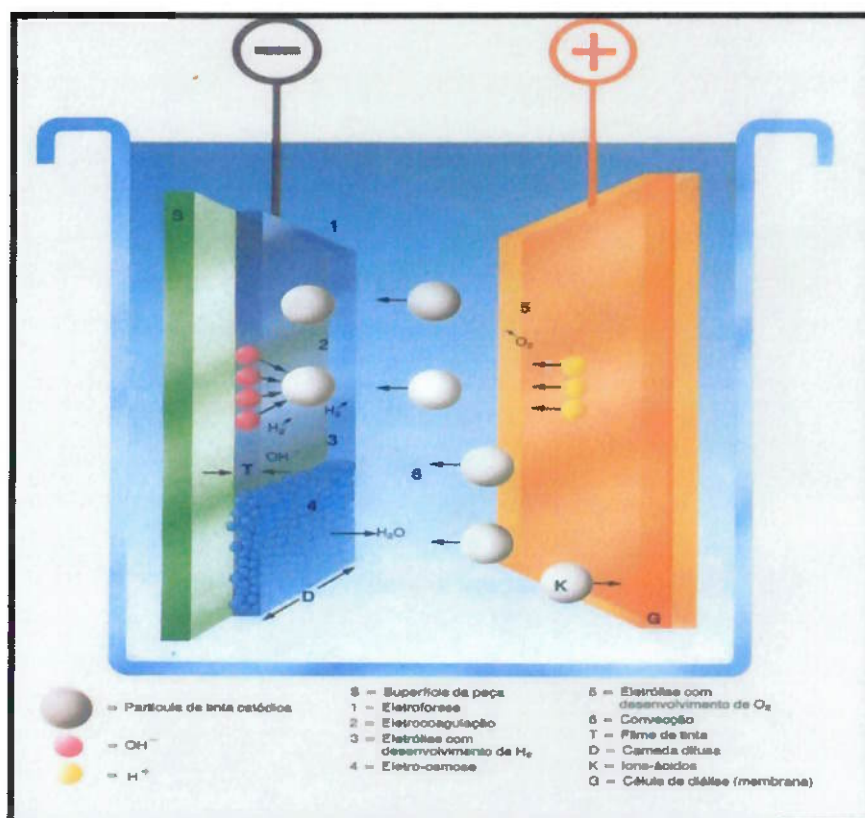


Figura 2.4 – Fenômenos ocorridos durante o processo de pintura eletroforética

Fonte: MARTIRE NETO [1985], p. 5

O tempo do processo de pintura eletroforética varia de dois a quatro minutos. Ao final da última etapa de imersão, a carroçaria carrega consigo uma parte da tinta aderida mecanicamente. Esta tinta deve ser removida por um estágio de lavagem

que não afetará o filme eletro depositado, uma vez que este é totalmente insolúvel neste estágio e aderente ao substrato.

Feita a lavagem, a carroçaria é curada em estufa.

Resumindo, vide na Figura 2.5 esquema simplificado do tratamento superficial da carroçaria antes de receber a pintura final.

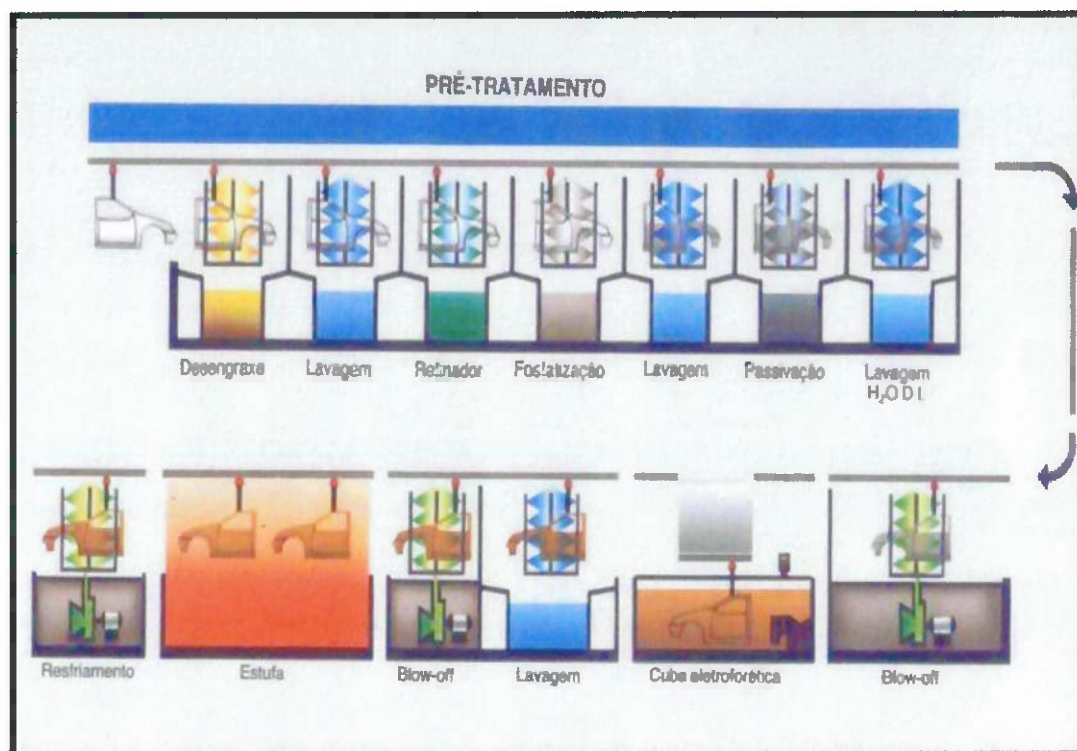


Figura 2.5 – Esquema de Tratamento Superficial

Fonte: MARTIRE NETO [1985], p. 7

2.1.3 Calafetação de painéis

Calafetação é a parte do processo que possibilita a vedação de junções de chapas internas e externas (compartimento do motor, assoalho, portas, etc.) com a finalidade de impedir a penetração de água, poeira e outras impurezas, como também proteger contra corrosão. O selante utilizado é à base de PVC e Plastisol e sua aplicação é feita por filetes, podendo ou não ser pincelado, e/ou pulverizado, sendo esta operação manual ou automática.

A cor, viscosidade, penetração, teor de sólidos, peso específico e janela de cura dos selantes devem atender as especificações da montadora de automóveis.

Nas indústrias automobilísticas a calafetação de painéis é feita no departamento de pintura sobre a carroçaria em *e-coat* (pintura eletroforética). E, além da vedação dos painéis, é pulverizado PVC spray nas partes externas da unidade, tais como caixas de rodas, longarinas e assoalhos, que é responsável pela proteção contra batidas de pedras, ruídos, corrosão e agentes químicos (gasolina, álcool, querosene, etc.).

Toda massa de calafetação será curada na estufa do próximo processo (aplicação de *primer*).

2.1.4 Aplicação de *primer*

Após a pintura eletroforética e calafetação de painéis, há a aplicação de *primer*, conhecido também, segundo FAZENDA (2005), por *primer surfacer*. Esta aplicação é feita sobre o *e-coat* curado.

FAZENDA (2005) também ressalta que as principais funções do *Primer* são:

- Nivelar e preparar a superfície para camadas subseqüentes (base e verniz);
- Otimizar a resposta da carroçaria pintada a exigências mecânicas, principalmente na forma de resistência a batidas de pedra;
- Proteger o *e-coat*, que apresenta excelente resistência à corrosão, porém limitada a degradação causada pela luz, especialmente quando considerada a região do ultravioleta (UV 290-380 nm).

Os requisitos básicos da tinta *primer* pedem que a mesma seja à base de resinas tipo poliéster convertíveis, termofixas, com pigmentação inerte e aditivação apropriada para se obter a boa aparência desejada após a pintura.

É necessário também que os valores de viscosidade, dureza e teor de não voláteis obedeçam à especificação solicitada pelo departamento de engenharia da montadora.

O processo de aplicação de *primer* pode ser manual, automático ou ambos. Uma fábrica bem desenvolvida geralmente conta com aplicação manual em regiões internas e automáticas nas regiões externas.

Para aplicações manuais utilizam-se pistolas que podem ser convencionais ou eletrostáticas, sendo que estas últimas garantem uma melhor transferência de tinta ao substrato e, conseqüentemente, economia no volume de *primer* aplicado, de acordo com ilustração da Figura 2.6.

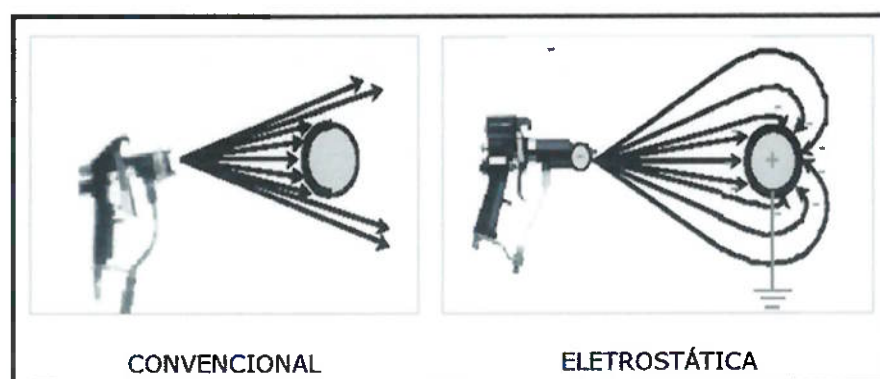


Figura 2.6 – Pistola Convencional vs Pistola Eletrostática

Fonte: GINECCO; MARIANO e FERNANDES (2003), p. 40

Para aplicações automáticas há várias alternativas de máquinas, turbos e robôs desenvolvidos para esta finalidade. Vide exemplo de robô na Figura 2.7.



Figura 2.7 – Exemplo de Robô utilizado na aplicação de *primer*

Fonte: TEKKSOLUTIONS (2011)

Depois de aplicado o primer, a unidade passa por uma estufa com velocidade, tempo e temperatura atingida na chapa controlados para cura da tinta e do conjunto PVC/plastisol.

O filme curado deverá possuir aspecto liso e uniforme, sem crateras, excessos de tinta ou qualquer outra imperfeição superficial.

Um plano de controle robusto de uma unidade em *primer* conta com medições por amostragem de aparência, espessura de filme seco, brilho e aderência.

2.1.5 Aplicação de *top coat* (acabamento)

Com isso o próximo processo é o acabamento, que conta com a aplicação de base e logo em seguida, verniz. A base é responsável pela cor final do carro. Já ao verniz compete o brilho e proteção química e física da pintura do veículo.

De acordo com FAZENDA (2005), o sistema que se estabeleceu como padrão dentro do mundo automotivo para acabamento de veículos, chama-se *wet-on-wet* de *basecoat/clearcoat* (base/verniz). Este processo foi desenvolvido na década de 1970 como sistema de revestimento de aparência superior, ganhando importância comercial na antiga Alemanha Ocidental. FAZENDA (2005) ainda afirma que:

Desde sua introdução em linhas de pinturas de carros de luxo no princípio da década de 1980, o uso do sistema de acabamento *basecoat/clearcoat* tem aumentado dramaticamente ao ponto em que ele é usado em todos os carros e caminhões para praticamente todas as cores. As vantagens do sistema *basecoat/clearcoat* são a excepcional aparência e a excelente retenção de brilho em comparação com outros sistemas.

Wet-on-wet consiste na aplicação de uma tinta base poliéster pigmentada (metálica, perolisada ou sólida) médio ou alto sólidos sobre a superfície curada de *primer*. Seguido a um período de 2 a 3 minutos de evaporação (*flash off*) dos solventes, aplica-se verniz acrílico transparente e, logo após, aquece-se este revestimento final em estufa, com temperatura de chapa e tempo controlados, momento este em que a base e o verniz são reticulados simultaneamente estabelecendo a cor, aparência e resistência.

A pintura final neste sistema deve possuir excelente aspecto, juntamente com uma superior resistência a riscos, à ação química e ao intemperismo.

O material deve apresentar boa aparência e boa qualidade de acabamento quando formulado para compatibilizar com qualquer cor aprovada para o processo produtivo.

Assim como a tinta *primer*, é necessário que todas as características físicas e químicas da base e verniz (viscosidade, dureza, teor de não voláteis, tonalidade, etc.) obedeçam à especificação solicitada pelo departamento de engenharia da montadora.

O processo de aplicação também pode ser manual, automático ou ambos assemelhando-se com o processo de aplicação do *primer*, descrito no subitem 2.1.4 e ilustrado nas Figuras 2.6 e 2.7.

As formulações de sistema base/verniz devem assegurar bons resultados nos mais variados processos de aplicação, tais como: pneumáticos, eletrostáticos, equipamentos automáticos e eletrostáticos de alta pressão (*turbobells*).

O filme curado deverá possuir aspecto liso, uniforme e brilhante, sem crateras, excessos de tinta, sujeiras ou qualquer outra imperfeição superficial.

Um plano de controle robusto de uma unidade em base/verniz conta com medições por amostragem de aparência, espessura de filme seco, brilho e aderência.

2.1.6 Etapas de inspeção

Normalmente, inserido no processo de pintura, há quatro principais etapas de inspeção:

- **Preparação do e-coat:** a unidade passa na linha de produção em *e-coat* curado e é inspecionada por operadores. Qualquer imperfeição que a superfície apresente, os operadores lixam o defeito e preparam a superfície de maneira a não comprometer as próximas etapas. Os defeitos possíveis de serem apontados nesta etapa são: excesso de *e-coat*, sujeiras, micro crateras, cavacos e/ou amassados provenientes da funilaria, entre outros;

- **Preparação do *primer*:** é semelhante à preparação do *e-coat*, entretanto a unidade passa na linha de produção em *primer* curado. Os defeitos possíveis de serem inspecionados são: excesso de *primer*, crateras, marcas de panos de limpeza, entre outros;
- **Finesse:** é a etapa de inspeção final. É feito um verdadeiro “pente fino” na unidade já pintada e pronta para ir para a montagem. É nessa inspeção que é tomada a decisão de passa ou não passa. Operadores avaliam o carro inteiro e, achando alguma discrepância, avaliam se é possível retrabalhar a unidade. Sendo possível, a unidade está aprovada. Se não, a unidade é rejeitada e retrabalhada. Os defeitos mais comuns de serem encontrados dentro do processo finesse são: sujeiras, crateras, excesso de tinta, casca de laranja, opacidade, cor fora de tonalidade, defeitos de funilaria, etc.;
- **Estação de Verificação:** em algumas montadoras há, após o finesse, uma estação onde funcionários do departamento da qualidade fazem uma inspeção/avaliação final do carro pintado liberando, ou não, a unidade para as etapas de montagem.

3 OPERAÇÃO EVOLUTIVA (EVOP)

De acordo com CALEGARE (1985), em virtude dos “jogos de azar” (dados, moedas, cartas, roletas, entre outros) os estudos relacionados à probabilidade começaram formalmente no século XVII. Entretanto, foi na década de 1920 que a utilização e desenvolvimento de ferramentas de estatística passaram a contribuir fortemente com o controle da qualidade nas empresas.

E, desta forma, vários estudos para melhoria de processos contribuem cada vez mais para validação e verificação da qualidade. Segundo DRUMOND³ et al. (1999) apud COSTA SOBRINHO (2002),

As técnicas estatísticas de otimização de processos utilizam-se de experimentos seqüencialmente planejados de forma a obter a condição ótima para cada processo, com o menor número possível de experimentos. Esse tipo de pesquisa experimental em uma indústria tem como objetivos principais pesquisar as condições ótimas para operação de um processo ou obtenção de um novo produto; conhecer o comportamento das variáveis de interesse dentro das fronteiras de operação de uma planta industrial; e selecionar os níveis de controle dos parâmetros do processo para alcançar as especificações dos clientes.

Dentre as diversas técnicas que contribuem para a melhoria do processo, o delineamento de experimentos (DOE) é uma poderosa ferramenta para otimização e aperfeiçoamento de operações em geral.

De acordo com CALEGARE (2009): “Delineamento de experimentos é o plano formal para conduzir o experimento. Inclui a escolha dos fatores, níveis e tratamentos e número de réplicas”.

Esta ferramenta garante um excelente custo/benefício para o controle da qualidade, uma vez que é de simples execução e permite um processo mais robusto com eliminação/minimização de fontes externas de variabilidade.

³ DRUMOND, F. B.; DELLARETTI FILHO, O.; CHENG, L. C. **Integração do desdobramento da função qualidade (QFD) e métodos estatísticos ao desenvolvimento de produtos**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO DE DESENVOLVIMENTO EM PRODUTOS E INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON QUALITY FUNCTION DEPLOYMENT, 1, 1999, Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte: IQFD & GDP, 1999.

E uma vertente mais simples ainda do DOE é o método EVOP. O mesmo conta com pequenas mudanças em determinada operação. BOX (1968), o grande mentor do método, doutrina que cada ciclo de experimentos deve ser muito bem planejado com variações pequenas combinadas com o processo de trabalho. Em outras palavras, os experimentos devem ser executados durante a produção diretamente pelos próprios colaboradores da operação a ser otimizada, sem que haja alteração na rotina de produção, parada de linha ou perda de produtividade.

BOX (1968) também compara o método com a teoria da seleção natural, pois na mesma há variabilidade genética e seleção natural propriamente dita. Ou seja, há mutação de espécies para melhor adaptação ao meio. Com a aplicação da EVOP em um determinado processo, haverá novas descobertas (mutação) e ajuste das variáveis para que haja otimização e melhoria contínua.

Complementando, MONTGOMERY (2009) afirma que:

EVOP consiste na introdução sistemática de pequenas mudanças nos níveis das variáveis operacionais de um processo. O procedimento exige que se atribua um nível "alto" e um nível "baixo" a cada variável independente do processo. Admite que as modificações nas variáveis sejam suficientemente pequenas, a fim de que não ocorram perturbações sérias na qualidade do processo, mas grandes o bastante para que eventualmente se descubram melhoramentos potenciais no desempenho do processo.

No que diz respeito ao planejamento experimental da EVOP, BOX (1968) sugere os planejamentos fatoriais 2^k , onde $k=2$ ou $k=3$, uma vez que trabalhar com número de variáveis maior que três faz com que o método perca seu maior trunfo: a simplicidade.

Outro ponto a ser considerado é o fato de que para a aplicação da operação evolutiva ser positiva, é necessário comprometimento de todas as pessoas envolvidas no estudo, desde o mais baixo até o mais alto nível hierárquico.

Além disso, CALEGARE (2009) recomenda alguns passos a serem seguidos para o sucesso na aplicação da metodologia EVOP:

- Estudar e conhecer o processo a ser otimizado através de leitura, análise de resultados relacionados a produção, qualidade, custo, etc. e sondagem;
- Obter o apoio da Administração;

- Treinar o pessoal envolvido com o processo;
- Fazer *brain-storming* com os técnicos e especialistas dos vários departamentos envolvidos (equipe multidisciplinar) para que seja decidido em equipe qual é resposta mais importante e quais são os fatores controláveis mais influentes para o processo;
- Planejar meticulosamente o experimento (delineamento);
- Executar o experimento promovendo pequenas mudanças nos níveis dos fatores controlados em torno do valor atual.

4 ESTUDO DE CASO

4.1 Caracterização da empresa

A Empresa Alpha Cars é uma indústria automobilística que foi fundada em setembro de 1908 nos Estados Unidos. Começou seus investimentos no Brasil em 1925 e hoje registra no país seis complexos industriais e comerciais, mais quatro projetos anunciados em andamento, um centro tecnológico, o maior portfólio de produtos do mercado nacional e uma capacidade de produção anual de 750 mil veículos.

No começo, a empresa tinha como atividade a montagem de veículos importados dos Estados Unidos, registrando, já em 1935, a produção do seu veículo número 100 mil. Em 1968, a Alpha Cars do Brasil lançou seu primeiro automóvel de passeio no país, que encerrou seu ciclo de vida com mais de um milhão de unidades vendidas.

Atualmente a Alpha Cars do Brasil é a maior subsidiária da corporação na América do Sul e a segunda maior operação fora dos Estados Unidos. Tem três grandes complexos para produção de veículos localizados no Brasil sendo dois no estado de São Paulo (identificados como Complexo A e Complexo B) e um no estado Rio Grande do Sul, além de possuir também uma fábrica destinada para produção de peças no interior de São Paulo. A empresa conta com um Centro Tecnológico e está previsto para os próximos anos uma fábrica de motores na região Sul do Brasil.

O Complexo A da Alpha Cars, onde o estudo do presente trabalho é desenvolvido, foi inaugurado em 1930 e atualmente produz seis modelos de veículos diferentes.

Atualmente está produzindo 53 veículos por hora e operando com dois turnos sendo que há previsão para implantação de um terceiro turno no final do primeiro semestre de 2011. No ano passado o Complexo A produziu cerca de 200 mil veículos e, com a introdução de mais um turno, é esperado que essa capacidade anual aumente esse volume para 250 mil carros.

4.1.1 Departamento de pintura da Alpha Cars Complexo A

O Departamento de Pintura do Complexo A está inserido no MVA (Montagem de Veículos Automotores). Em 2007 este departamento ganhou o prêmio de “Melhor Pintura da Corporação” devido aos seus excelentes índices de Qualidade e, até o presente momento, continua mantendo este título.

A Pintura é gerenciada por um superintendente (gerente) e dividida em três grandes grupos: manutenção, produção e laboratório. A Figura 4.1 ilustra o funcionamento dessas três grandes unidades gerenciais de primeiro nível, tal como CAMPOS (2004) propõem em seu livro (p. 158):

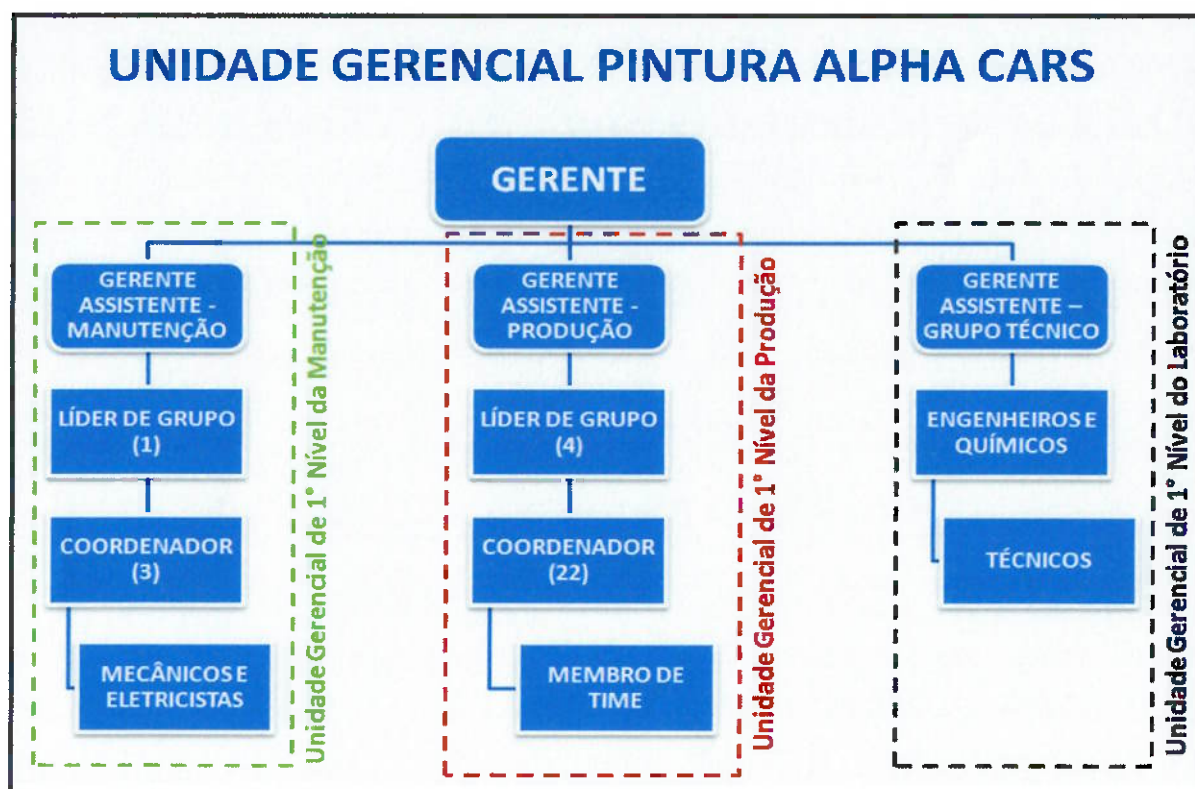


Figura 4.1 – Unidade gerencial da pintura da Alpha Cars do complexo A

Fonte: Modificado de CAMPOS (2004), p. 158

As unidades a serem pintadas sobem da Funilaria através de um elevador iniciando o processo de pintura que engloba os tratamentos superficiais (pré limpeza, fosfatização e pintura eletroforética), calafetação e aplicação de *primer*, base, verniz. Após as etapas de inspeção final de pintura, as unidades pintadas

descem, através de outro elevador, para a área de montagem que engloba toda parte de tapeçaria e mecânica.

4.2 Processo otimizado

O processo estudado e otimizado é a aplicação de base. Na Alpha Cars complexo A este é um processo quase 100% automatizado. A carroçaria, ao entrar na cabine de aplicação, recebe duas demãos manuais de tinta nas partes internas (soleiras, colunas e quadros de porta internos). Esta operação é realizada por quatro operadores que se dividem em: 1ª Demão – lado direito, 1ª Demão – lado esquerdo, 2ª Demão – lado direito e 2ª Demão – lado esquerdo. A próxima etapa é a aplicação externa, totalmente automática, feita pela máquina Sames e, somente para cores metálicas e perolisadas, há aplicação de uma segunda demão automática realizada pelo robô Fanuc.

A Figura 4.2 mostra o mapa de processo da aplicação de base desde o recebimento da unidade em *primer* até a inspeção final.

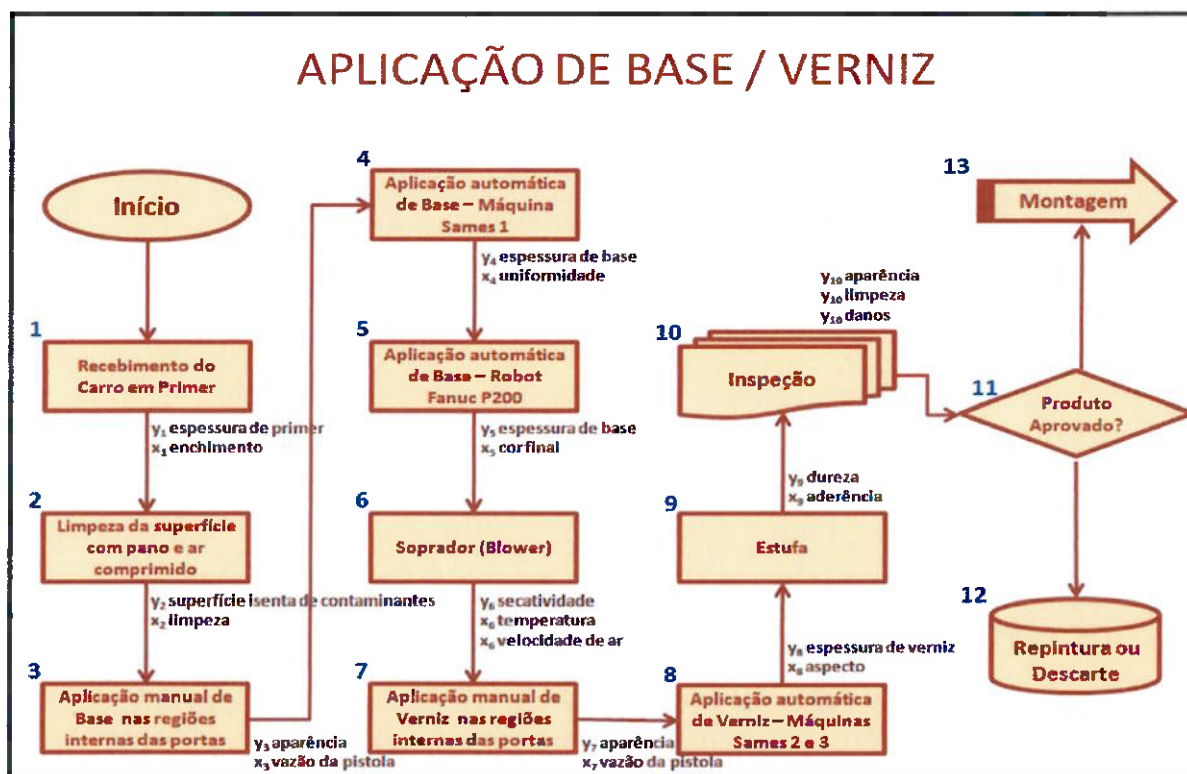


Figura 4.2 – Mapa de processo – aplicação de base/verniz

A especificação de camada de base é de no mínimo 10 μm . A camada real está em torno de 10 μm na área horizontal e de 15 μm a 18 μm na área vertical.

Por ser um material "poroso", é sabido que uma camada de base uniforme e próxima do limite inferior é desejável para uma boa aparência de Pintura.

O verdadeiro interesse em melhorar este processo é otimizar a qualidade de aplicação, reduzir camada e, conseqüentemente consumo de base nas áreas verticais dos automóveis. Para isso serão feitos experimentos nos parâmetros de aplicação vertical da máquina Sames com a cor sólida Preta. A máquina Sames tem nove sinos que aplicam base, sendo três responsáveis pela área horizontal, três pela vertical do lado esquerdo e três pela vertical do lado direito.

4.3 Planejamento

O planejamento utilizado para desenvolvimento deste trabalho está baseado em COSTA SOBRINHO, pois, através da estrutura de sua tese, é possível observar foco, organização e sucesso no estudo desenvolvido pelo autor.

4.3.1 Condução do estudo de caso

A escolha do processo de aplicação de base para o estudo do método EVOP foi devido ao interesse em melhoria da qualidade da aparência da região vertical da carroçaria, bem como à redução na quantidade de tinta, em L/unidade.

Como já citado no item 4.1, a Alpha Cars opera com uma velocidade de linha de 53 carros/hora, assim como na cabine de aplicação de base. Este é um fator muito favorável, pois é possível fazer uma infinidade de experimentos sem prejuízo de produtividade e qualidade.

E, deste modo, foi apresentada a proposta do estudo de caso ao gerente da pintura do complexo A que disponibilizou uma equipe multifuncional para condução do trabalho. Esta equipe contou com o coordenador da cabine de base, um técnico eletricista de manutenção, o engenheiro químico responsável pelo processo, um assistente técnico (fornecedor da tinta) e a engenheira de qualidade. Cada um desses especialistas teve uma função específica no estudo:

- Gerente do departamento de pintura: responsável em aprovar o estudo e disponibilização dos integrantes da equipe;
- Coordenador da cabine de base: responsável pela cabine e por quatro membros do time de aplicação de base. Junto com a equipe acompanha os experimentos e, no caso de alguma falha, corrige o problema (geralmente através de repasse manual);
- Técnico eletricitista de manutenção: responsável pelas alterações de parâmetros no programa da máquina Sames. No caso de alguma falha, intercede na máquina;
- Engenheiro químico: responsável por coordenar as medições dos fatores controláveis, não controláveis e saídas (que são detalhados em 4.3.2);
- Assistente técnico: funcionário da empresa fornecedora de tinta, sendo responsável por tudo que envolve o seu produto (no caso, a base estudada);
- Engenheira de Qualidade: responsável pela coordenação do planejamento do trabalho e análise dos resultados.

4.3.2 Estrutura do processo

A aplicação de base sólida preta é feita pela máquina Sames. Esta máquina é composta por nove sinos que pulverizam tinta, sendo três responsáveis pela área horizontal, três pela vertical do lado esquerdo e três pela vertical do lado direito. Assim como na Figura 4.3.

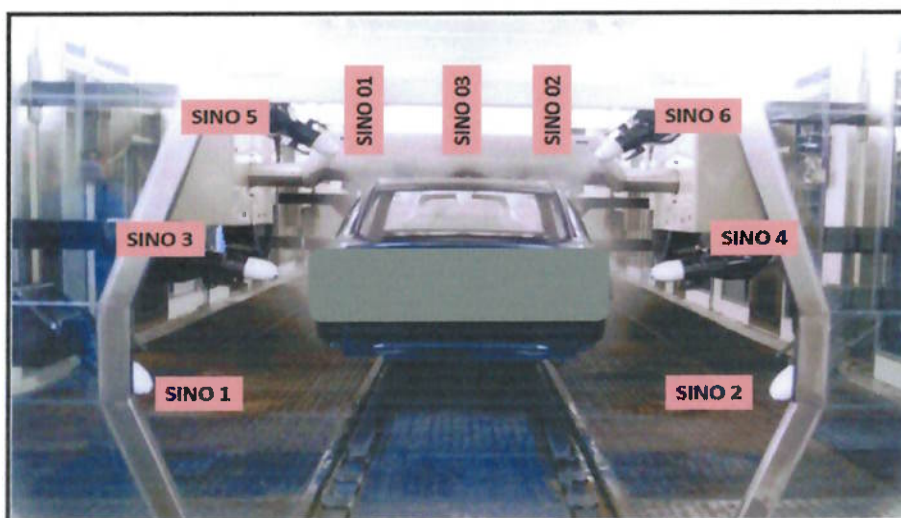


Figura 4.3 – Máquina Sames

Note que os sinos 1 e 2 pintam a vertical inferior do carro (região da soleira), os sinos 2 e 3 pintam a vertical central das portas e paralamas e os sinos 5 e 6 a vertical superior da carroceria.

Os sinos utilizados na máquina são modelo EC65 que tem o formato de uma tulipa (Figura 4.4). Este modelo de sino proporciona melhor atomização e uniformidade de aplicação.



Figura 4.4 – Sino modelo EC65

A máquina que opera no complexo do A do estado de São Paulo tem flexibilidade para pintar até 15 diferentes cores, independente da ordem, pois tem um eficiente ciclo de limpeza que utiliza ar/solvente para lavagem dos sinos.

Para programação de todos os parâmetros de cinemática e aplicação, o sistema Sames conta com uma estação de computadores com software específico (Figura 4.5), *scanner* para leitura da cor e modelo do carro e uma central de CLP's (Controladores lógicos programáveis).



Figura 4.5 – Estação de computadores para operação da Sames

Fonte: Ilustração gentilmente cedida pela Sames do Brasil

Como já citado, a cor escolhida para o estudo é a base sólida preta, uma vez que qualquer possível alteração de qualidade em aparência de pintura e brilho é melhor visualizada nesta cor.

Também é fixado um modelo de carro: Zyon. Este é um modelo sedã, compacto e de grande volume de produção e aceitação no mercado.

Acompanhando os dados de produção do último trimestre de 2011, dos seis diferentes modelos fabricados na Alpha Cars do complexo A, 36% do volume de produção são destinados ao modelo Zyon. E nessa fatia, 48% são pintados em preto superando, com este número, os “famosos” e constantes Zyons pintados em prata.

4.3.3 As variáveis do processo

No processo de aplicação de base, há duas possíveis entradas:

- Modelo da carroçaria;
- Cor da base.

Dos seis possíveis modelos, foi selecionado o modelo Zyon (vide 4.3.2) e das doze possíveis cores foi selecionada a cor sólida preta. A propósito, as demais cores são: outra preta, porém perolisada, uma prata, uma bege, duas vermelhas (sendo uma sólida e outra perolisada), três verdes, uma azul, uma branca sólida e uma cinza metálica.

Quanto aos fatores controláveis e não controláveis, podem ser consideradas diversos parâmetros no estudo de otimização. Dentre eles, destacam-se:

Principais Fatores Controláveis:

- Vazão de aplicação;
- Pressão do ar de leque;
- Distância dos sinos verticais em relação à carroçaria;
- Inclinação dos sinos verticais em relação à carroçaria;
- Tensão de aplicação;
- Velocidade de turbina;

- Modelo do carro;
- Temperatura interna da cabine de aplicação de base;
- Umidade relativa interna da cabine de aplicação de base;
- Balanceamento de ar da cabine;
- Viscosidade da base sólida preta;
- Secatividade da base sólida preta;
- Temperatura da base sólida preta;
- Velocidade de linha.

Principais Fatores Não Controláveis:

- Temperatura externa;
- Umidade relativa externa;
- Possíveis falhas na máquina que ocasionam parada de linha.

Para a aplicação da EVOP, a seleção dos fatores controlados a ser utilizados (descritos no próximo item – 4.3.4) foi feita de forma que a melhoria do processo acontecesse com o mínimo de investimento e de custo possível sem afetar a qualidade.

Como principais saídas têm-se a espessura da camada de tinta (em μm), o *rating* que é um número adimensional (de 1 a 10) que mede aparência (efeito “casca de laranja”) de pintura automotiva e o consumo (em L/unidade) de tinta (base sólida preta) gasto.

4.3.4 Planejamento experimental

Assim como citado no item 4.2, o interesse em melhorar este processo é aperfeiçoar a qualidade de aplicação da base sólida preta, reduzir camada e, conseqüentemente consumo de base nas áreas verticais dos automóveis.

Desta forma, foi considerado no programa EVOP, o planejamento fatorial 2^2 , conforme Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Delineamento de experimento para aplicação da base sólida preta

Tipo de Experimento	Fatores Controlados	Tratamentos	Nº de Réplicas
Fatorial 2 ²	vazão de aplicação	80% / 100%	5
	pressão de ar de leque	80% / 100%	

Sobre os fatores controlados, são estudadas vazão de aplicação e pressão de ar de leque.

A vazão de aplicação é a quantidade de tinta, em mililitros por minuto (mL/min.), pulverizada na carroçaria. No esquema apresentado na Figura 4.6, corresponde à área em amarelo.

A pressão de ar de leque, em bar, corresponde, como o próprio nome diz à pressão aplicada à válvula que comanda a saída da tinta. É inversamente proporcional ao tamanho do leque, ou seja, quanto maior for a pressão aplicada, menor será o tamanho de abertura do leque. Para ilustrar, na Figura 4.6 este tamanho de abertura está identificado com uma seta vermelha no sino 5.

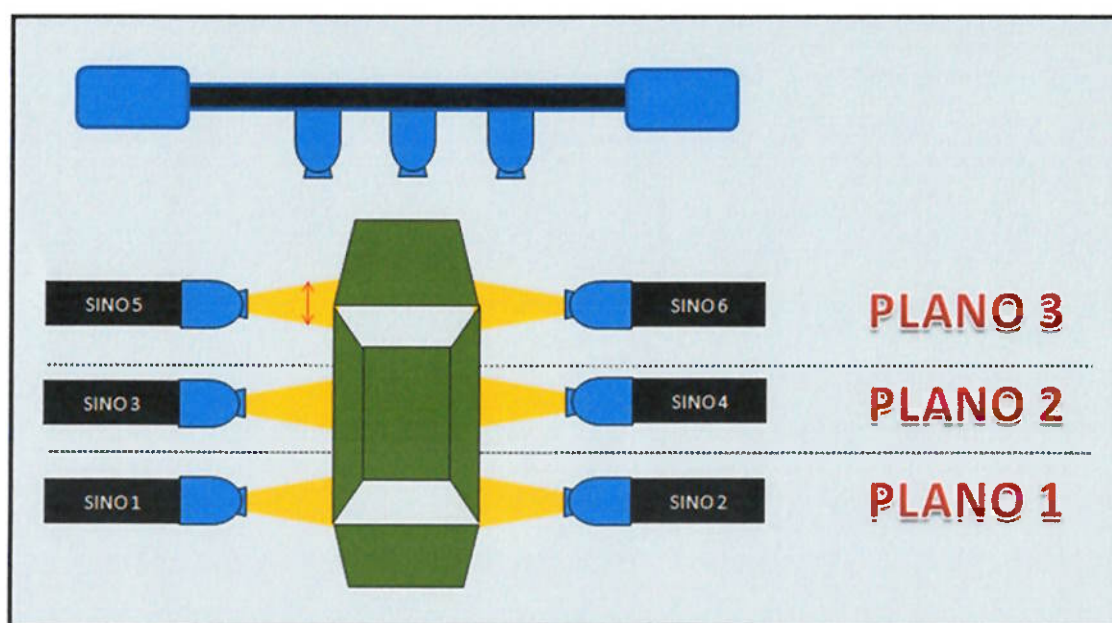


Figura 4.6 – Esquematização da máquina Sames

Observe também na Figura 4.6, e facilmente percebido na Figura 4.3, que cada par de sinos corresponde a um determinado plano. Assim, o plano 1 é responsável pela região da soleira da carroceria (sinos 1 e 2), o plano 2 pelos

centros de portas e paralamas (sinos 3 e 4) e o plano 3 pelos quadros de porta e colunas (sinos 5 e 6).

Na programação da máquina, os valores de aplicação são dispostos em tabelas de aplicação que se dividem de acordo com a região do carro. Têm-se, então, quatro tabelas:

- Tabela do teto (sinos 01, 02 e 03);
- Tabela do plano 1 (sinos 1 e 2);
- Tabela do plano 2 (sinos 3 e 4);
- Tabela do plano 3 (sinos 5 e 6).

Estas tabelas são programadas de acordo com a cor e modelo do carro. Para efeito de melhor compreensão, a Figura 4.7 mostra um exemplo de tabela de aplicação de uma região, cor e modelo quaisquer.

FATORES CONTROLÁVEIS

Abcissa (cm)	Pulv. 1 (01)	Pulv. 2 (02)	Pulv. 3 (03)	Caudal (ml/min)	Pressão (bar)	Vel. Turb. (kl/min)	Alta Tensão (kV)	Rotação da Viga (°)	Altitude (cm)	Separação Pulv (cm)	Seguim. (cm)	Oscilação (cm)	Amplitude (cm)	Período (cm)
10	1	1	1	100	25	30	30	70	95	80	140			
16	1	1	1					84	95		115	15	20	20
36	1	1	1					84	95	96	126			
89	1	1	1					82	100		110			
130	1	1	1					84	107	120	106			
170	0	0	1					84	131					
207	1	1	1					78	152		123			
242	1	1	1	140	25			90	161	90	120			
286	0	0	1					84	161		116			
311	1	1	1					90	162		114			
333	1	1	1					96	162		112			
362	1	1	1					90	155		109			
416	1	1	1					90	155		100			
430	1	1	1					90	137		80			
435	1	1	1					90	120		60			
440	0	0	0						110		40			

Figura 4.7 – Ilustração de tabela de parâmetros

Neste tipo de tabela de aplicação é mostrado o parâmetro real, isto é, no exemplo ilustrado se observa que para a abscissa 242, o valor de pressão é de 25 bar e a vazão, que na Figura 4.7 está citada com a palavra espanhola *caudal*, é de 140 mL/min.

Os tratamentos dos fatores controlados para vazão e pressão de ar de leque correspondem às tabelas de aplicação dos planos 1, 2 e 3 com 80% e 100% dos parâmetros reais de aplicação de cada um, onde 100% de vazão e 100% de pressão de ar de leque representam as condições atuais do processo.

Já a saída mais interessante, é o consumo, em litros de base preta sólida por unidade pintada. O valor do consumo é observado e anotado através de um medidor de vazão (*flowmeter*) instalado na máquina Sames.

Resumindo, a Figura 4.8 apresenta graficamente o planejamento experimental do programa EVOP para este estudo de caso.

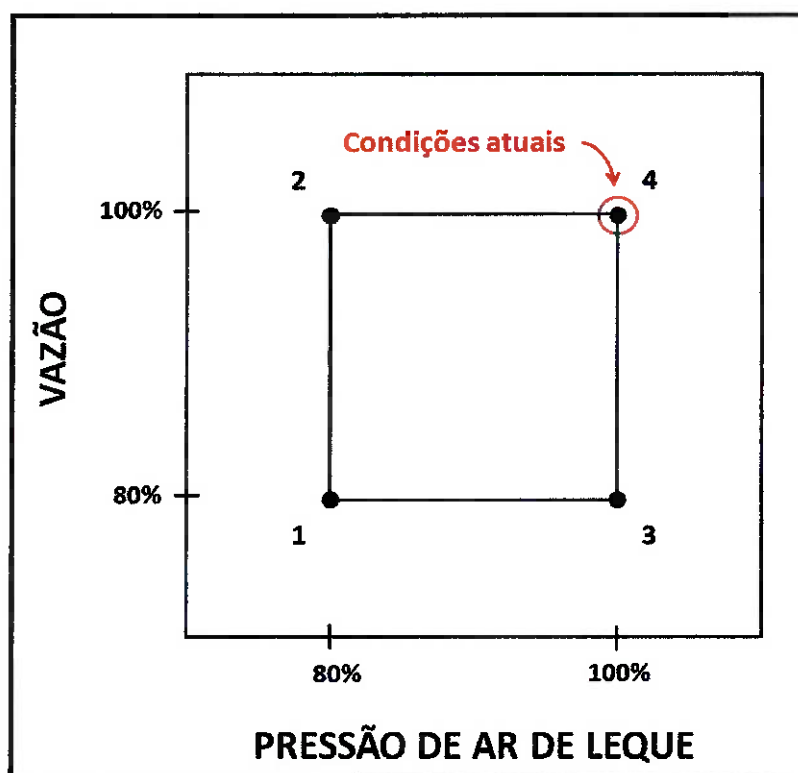


Figura 4.8 – Planejamento experimental do programa EVOP

Todo este planejamento citado deve-se a reuniões, discussões e tomadas de decisão da equipe multidisciplinar, mencionada no subitem 4.3.1.

A Tabela 4.2 representa o planejamento experimental dos ensaios na região horizontal do modelo Zyon indicando a quantidade, seqüência, os níveis dos fatores e os ciclos.

Tabela 4.2: Ensaios do programa EVOP para redução de consumo de base.

Ensaio	Ciclo	Vazão (codificada)	Pressão de ar de leque (codificada)	Vazão (%)	Pressão de ar de leque (%)
1	1	-1	-1	80	80
2	1	1	-1	100	80
3	1	-1	1	80	100
4	1	1	1	100	100
5	2	1	1	100	100
6	2	-1	1	80	100
7	2	1	-1	100	80
8	2	-1	-1	80	80
9	3	-1	-1	80	80
10	3	1	-1	100	80
11	3	-1	1	80	100
12	3	1	1	100	100
13	4	1	1	100	100
14	4	-1	1	80	100
15	4	1	-1	100	80
16	4	-1	-1	80	80
17	5	-1	-1	80	80
18	5	1	-1	100	80
19	5	-1	1	80	100
20	5	1	1	100	100

4.4 Resultados e discussão

Cada ciclo foi realizado em um dia, durante o primeiro turno produtivo. Logo, os ciclos propostos no modelo Zygon pela Tabela 4.2 foram concluídos em cinco dias, na semana de 14 a 18 de março de 2011.

4.4.1 Condução dos experimentos

Cada integrante da equipe multidisciplinar descrita no subitem 4.3.1 teve papel fundamental na execução de cada ciclo, superando as expectativas no cumprimento do papel determinado.

Os experimentos realizados na pintura da Alpha Cars Complexo A foram acompanhados integralmente de forma a garantir que os dados não fossem afetados por fatores desconhecidos.

Além disso, nenhum investimento adicional foi feito no processo de aplicação de base cor preta sólida durante o estudo de caso.

Assim como observado na Tabela 4.2, cada ciclo conta com quatro experimentos. A saber: 1,1; 1,-1; -1,1 e -1,-1.

4.4.2 Resultados obtidos

Os resultados de consumo em L/unidade Zygon obtidos são mostrados na Tabela 4.3, onde n = número de réplicas (ciclos) = 5.

Tabela 4.3: Resultados obtidos na execução dos cinco ciclos do experimento

Fator Vazão (V)	Fator Pressão (P)	Combinação	Ciclos					Total
			1	2	3	4	5	
+	+	VP	2,6	2,7	2,6	2,8	2,8	13,5
+	-	V	2,5	2,4	2,6	2,6	2,5	12,6
-	+	P	2,0	2,2	2,0	2,2	2,1	10,5
-	-	(1)	1,9	2,2	2,1	2,0	2,1	10,3

Partindo-se da Tabela 4.3, são calculados os efeitos principais de V, P e VP e as somas dos quadrados SQ_V (vazão), SQ_P (pressão), SQ_{VP} (combinação) e SQ_T (total), conforme Figura 4.9, para análise de variância ao nível de significância de 5% (Tabela 4.4).

Consultando MONTGOMERY (2009) e CALEGARE (2009), tem-se:

- Efeitos principais:

$$V = 1/2n [v + vp - p - (1)] = 0,1 [12,6 + 13,5 - 10,5 - 10,3] = 0,1 [5,3] = 0,53$$

$$P = 1/2n [p + vp - v - (1)] = 0,1 [10,5 + 13,5 - 12,6 - 10,3] = 0,1 [1,1] = 0,11$$

$$VP = 1/2n [vp + (1) - v - p] = 0,1 [13,5 + 10,3 - 12,6 - 10,5] = 0,1 [0,7] = 0,07$$

$$SQ_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn}$$

Efeitos principais

$$SQ_A = \sum_{i=1}^a \frac{y_{i..}^2}{bn} - \frac{y_{...}^2}{abn}$$

$$SQ_B = \sum_{j=1}^b \frac{y_{.j.}^2}{an} - \frac{y_{...}^2}{abn}$$

Interação

$$SQ_{AB} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \frac{y_{ij.}^2}{n} - \frac{y_{...}^2}{abn} - SQ_A - SQ_B$$

Erro

$$SQ_E = SQ_T - SQ_A - SQ_B - SQ_{AB}$$

Figura 4.9 – Cálculo da Soma dos Quadrados

Fonte: MONTGOMERY (2009), p. 374

- Soma dos quadrados:

$$SQ_V = \frac{1}{4n} [v + vp - p - (1)]^2 = 0,05 [5,3]^2 = 1,4045$$

$$SQ_P = \frac{1}{4n} [p + vp - v - (1)]^2 = 0,05 [1,1]^2 = 0,0605$$

$$SQ_{VP} = \frac{1}{4n} [vp + (1) - v - p]^2 = 0,05 [0,07]^2 = 0,0002$$

$$SQ_T = Q - [T^2 / (t_v \cdot t_p \cdot n)] = 111,63 - (46,9^2 / 2 \cdot 2 \cdot 5) = 111,63 - 109,98 = 1,6495$$

Onde:

Q = soma dos quadrados dos resultados de consumo obtidos nos ciclos;

T = soma total dos resultados de consumo obtidos nos ciclos;

t_v = número de tratamentos do fator vazão;

t_p = número de tratamentos do fator pressão.

- Tabela de análise de variância ao nível de significância de 5%:

A tabela de análise de variância para o estudo de caso é construída de acordo com a Figura 4.10.

Fonte de Variação	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F_0
A	SQ_A	$a - 1$	$MQ_A = \frac{SQ_A}{a - 1}$	$F_0 = \frac{MQ_A}{MQ_E}$
B	SQ_B	$b - 1$	$MQ_B = \frac{SQ_B}{b - 1}$	$F_0 = \frac{MQ_B}{MQ_E}$
Interação	SQ_{AB}	$(a - 1)(b - 1)$	$MQ_{AB} = \frac{SQ_{AB}}{(a - 1)(b - 1)}$	$F_0 = \frac{MQ_{AB}}{MQ_E}$
Erro	SQ_E	$ab(n - 1)$	$MQ_E = \frac{SQ_E}{ab(n - 1)}$	
Total	SQ_T	$abn - 1$		

Figura 4.10 – Tabela de Análise de Variância

Fonte: MONTGOMORY (2009), p. 374

Com isso, a Tabela 4.4 mostra a análise de variância para otimização da aplicação de base preta sólida na região vertical do modelo Zyon:

Tabela 4.4: Análise de variância para otimização da aplicação de base preta

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Quadrados Médios	$F_{\text{calculado}}$	$F_{\text{crítico}}$
V	1,4045	1	1,4045	121,9316	4,49
P	0,0605	1	0,0605	5,2523	4,49
VP	0,0002	1	0,0002	0,0174	4,49
Resíduo	0,1843	16	0,01152		
Total	1,6495	19			

Vale ressaltar que os valores relacionados ao $F_{\text{crítico}}$ são consultados utilizando a tabela de distribuição F de Snedecor, utilizando grau de significância de 5%, conforme ANEXO A.

Deste modo, formulam-se as hipóteses;

- Hipóteses:

$$H_0: \mu_{V0} = \mu_{V1}; \mu_{P0} = \mu_{P1}$$

$$H_1: \mu_{V0} \neq \mu_{V1} \text{ e/ou } \mu_{P0} \neq \mu_{P1}$$

Ao nível de significância de 5%

Partindo dos resultados obtidos na Tabela 4.4, tem-se que, ao nível de 5% de significância que:

Para o fator vazão, $F_{\text{calculado}} (121,9316) > F_{\text{crítico}} (4,49)$. Portanto, rejeita-se H_0 , ou seja, há influência do fator vazão no experimento.

Para o fator pressão, $F_{\text{calculado}} (5,2523) > F_{\text{crítico}} (4,49)$. Portanto, rejeita-se H_0 , ou seja, também há influência do fator pressão no experimento.

Já para a interação entre os fatores vazão e pressão, $F_{\text{calculado}} (0,0174) \leq F_{\text{crítico}} (4,49)$. Portanto, aceita-se H_0 , ou seja, não há interação significativa entre os fatores vazão e pressão no experimento.

Além disso, o $F_{\text{calculado}}$ do fator vazão (121,9316) $> F_{\text{calculado}}$ do fator pressão (5,2523). Logo, a influência do fator vazão é muito maior do que a do fator pressão de ar de leque.

Para comparações múltiplas, não há necessidade de se fazer qualquer tipo de comparação, pois só existem dois níveis de tratamento para cada fator controlado.

A Tabela 4.5, a seguir, mostra as médias obtidas para cada combinação entre os tratamentos:

Tabela 4.5: Médias obtidas para cada combinação de tratamento.

<u>Vazão</u>	<u>Pressão de Ar de Leque</u>	
	80%	100%
80%	2,06	2,10
100%	2,52	2,70

A média mais baixa de consumo de base preta sólida foi de 2,06 L/unidade, obtida para a seguinte combinação de tratamentos: 80% da vazão e 80% da pressão de ar de leque da tabela da estação automática Sames. Esta combinação deve ser o novo padrão, servindo de referência para os estudos posteriores.

- Equação resultante da análise: $\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{1,2} x_1 x_2$

Onde:

β_0 = média das médias, ou seja, $46,9/25 = 2,345$

$$\beta_1 = V/2 = 0,53/2 = 0,265$$

$$\beta_2 = P/2 = 0,11/2 = 0,055$$

$\beta_{1,2} = 0$, pois não há interação significativa entre os fatores vazão e pressão.

Logo, a equação resultante da análise é: $\hat{y} = 2,345 + 0,265x_1 + 0,055x_2$

Analisando os resíduos:

$$\hat{y}_{(vp)} \rightarrow x_1 = +1; x_2 = +1 \rightarrow 2,345 + 0,265 + 0,055 = 2,665$$

$$\hat{y}_{(v)} \rightarrow x_1 = +1; x_2 = -1 \rightarrow 2,345 + 0,265 - 0,055 = 2,555$$

$$\hat{y}_{(p)} \rightarrow x_1 = -1; x_2 = +1 \rightarrow 2,345 - 0,265 + 0,055 = 2,135$$

$$\hat{y}_{(1)} \rightarrow x_1 = -1; x_2 = -1 \rightarrow 2,345 - 0,265 - 0,055 = 2,025$$

Com isso, subtraindo-se os resíduos da Tabela 4.3, apresenta-se a seguir a Tabela 4.6.

Tabela 4.6: Subtração entre resultados obtidos e resíduos encontrados na execução dos experimentos

Fator	Ciclos				
	1	2	3	4	5
VP	-0,065	0,035	-0,065	0,135	0,135
V	-0,055	-0,155	0,045	0,045	-0,055
P	-0,135	0,065	-0,135	0,065	-0,035
(1)	-0,125	0,175	0,075	-0,025	0,075

Com os dados da Tabela 4.6, obtém-se o Gráfico 4.1, feito com o auxílio do software Minitab 15.

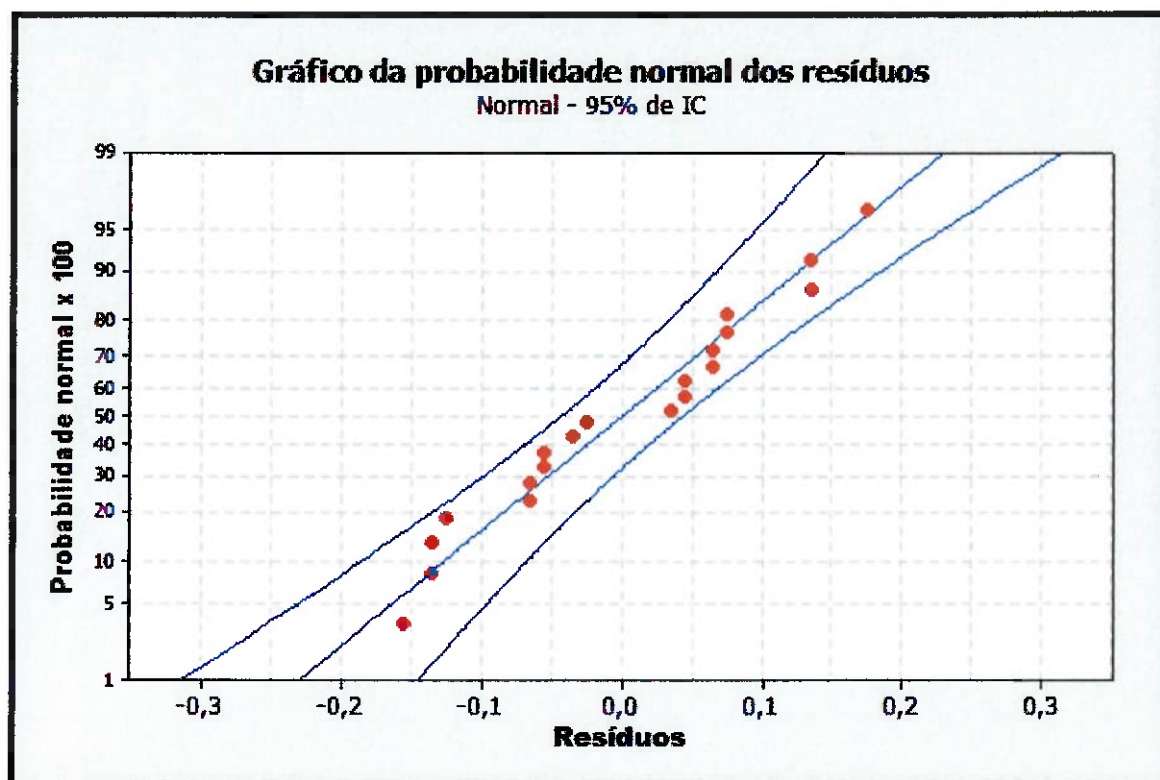


Gráfico 4.1: Resíduos

O Gráfico 4.1 é de probabilidade normal. O mesmo apresenta-se satisfatório, mostrando que os resíduos se distribuem normalmente.

Vale ainda ressaltar que para cada teste feito controlou-se camada de tinta, aparência, brilho, distinção de imagem e aderência. Todos os resultados foram satisfatórios estando dentro do especificado de engenharia.

5 CONCLUSÃO E ESTUDOS FUTUROS

É perceptível que as grandes montadoras de automóveis saíram de um sistema de qualidade tradicional e foram para um sistema de qualidade de classe mundial, gestão esta que visa estruturar a rotina de trabalho através da implementação de ferramentas estatísticas para controle de processo e para solução de problemas.

E quanto mais simples são estas ferramentas, melhor e mais rápido o processo flui. Observa-se que o método operação evolutiva é uma ferramenta de fácil execução podendo ser utilizada para qualquer tipo de processo de pintura automotiva na empresa Alpha Cars.

Implantando EVOP na aplicação da base preta sólida nas regiões verticais do modelo Zyon, observa-se que os fatores vazão e pressão de ar de leque possuem, separadamente, influência no consumo desta tinta.

Com isso, através da análise da variância dos resultados dos experimentos, é possível estabelecer facilmente, com cálculos relativamente simples, uma condição ótima para esse processo diminuindo, dessa maneira, o consumo de tinta base preta sólida nas regiões verticais dos Zyons.

O maior ponto positivo do método EVOP é o fato do mesmo ser executado diretamente na linha de produção sem que haja qualquer prejuízo na qualidade dos produtos fabricados.

Além disso, a operação evolutiva acaba garantindo qualquer tipo de retorno imediato, uma vez que é possível fazer melhorias no processo com pouco ou sem nenhum investimento.

Como sugestão para estudos futuros pretende-se:

- Explorar ainda mais a ferramenta estatística EVOP;
- Fazer mais fases do mesmo estudo de caso apresentado para confirmar e para melhorar ainda mais o processo;

- Fazer incrementos maiores nos fatores controláveis, ora fixando pressão de ar de leque, ora fixando o fator vazão;
- Realizar mais experimentos. Contando com a velocidade de linha de 53 carros por hora na aplicação de base e com quatro experimentos em cada ciclo, observa-se possibilidade de realização de um experimento a cada hora sendo plausível a realização de dois ciclos por turno;
- Fazer o mesmo estudo para as demais cores e para os demais modelos de carros na cabine de base;
- Estender o estudo para os outros processos de pintura;
- Compartilhar este estudo com os demais departamentos de pintura da corporação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANFAVEA. Disponível em <<http://www.anfavea.com.br/cartas/Carta298.pdf>>. Acesso em 30 abr. 2011.

BOX, G.; DRAPER, N. R. **Evolutionary operation: a statistical method for process improvement**. New York: John Wiley & Sons, 1969.

CALEGARE, A. J. A. **Introdução ao Delineamento de Experimentos**. 2ª ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2009.

CALEGARE, A. J. A. **Técnicas de Garantia da Qualidade**. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1985.

CAMINADA NETTO, A. **Gestão da qualidade em projeto e desenvolvimento do produto: contribuição para a avaliação da eficácia**. 2006, 317 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

CAMPOS, V. F. **Gerenciamento da Rotina de Trabalho do dia-a-dia**. 8ª ed. Nova Lima: INDG Tecnologia e Serviços Ltda., 2004. 266 p.

CHEMETALL. **A Fosfatização**. São Paulo: Chemetall do Brasil, [2003]. 115 p.

COSTA SOBRINHO, P. S. **Utilização da Metodologia Operação Evolutiva (EVOP) para melhoria de processo na indústria de alimentos**. 2002. 107 p. Tese ("Magister Scientiae"), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2002.

FAZENDA, J. M. R. et al. **Tintas & Vernizes**. 3ª ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2005. 1044 p.

GNECCO, C.; MARIANO, R.; FERNANDES, F. **Tratamento de Superfície e Pintura**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Siderurgia/Centro Brasileiro da Construção em Aço, 2003. 94 p.

MARTIRE NETO, N. **Eletroforese**. São Paulo: Apostila de Treinamento da Ideal Tintas, [1985]. 54 p.

MONTGOMERY, D. C. **Introdução ao controle estatístico da qualidade**. 4ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

MURAD, C.A. **Extensão as Garantia de Veículos: Aplicação para Motor e Transmissão**. 2005. 145 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Mestrado Profissionalizante em Engenharia Automotiva), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

TEKKSOLUTIONS. Disponível em <<http://tekksolutions.com/default.aspx>>. Acesso em 27 mar. 2011.

ANEXO A – Tabela de distribuição F de Snedecor

ANEXOS

125

ANEXO D

Distribuição F de Snedecor 2ª Parte: $\alpha = 5\%$

$\phi_1 \backslash \phi_2$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	∞
1	161,4	199,5	215,7	224,6	230,2	234,0	236,8	238,9	240,5	241,9	243,9	245,9	248,0	249,1	250,1	251,1	252,2	253,3	254,3
2	18,51	19,00	19,16	19,25	19,30	19,33	19,35	19,37	19,38	19,40	19,41	19,43	19,45	19,45	19,46	19,47	19,48	19,49	19,50
3	10,13	9,55	9,28	9,12	9,01	8,94	8,89	8,85	8,81	8,79	8,74	8,70	8,66	8,64	8,62	8,59	8,57	8,55	8,53
4	7,71	6,94	6,59	6,39	6,26	6,16	6,09	6,04	6,00	5,96	5,91	5,86	5,80	5,77	5,75	5,72	5,69	5,66	5,63
5	6,61	5,79	5,41	5,19	5,05	4,95	4,88	4,82	4,77	4,74	4,68	4,62	4,56	4,53	4,50	4,46	4,43	4,40	4,36
6	5,99	5,14	4,76	4,53	4,39	4,28	4,21	4,15	4,10	4,06	4,00	3,94	3,87	3,84	3,81	3,77	3,74	3,70	3,67
7	5,59	4,74	4,35	4,12	3,97	3,87	3,79	3,73	3,68	3,64	3,57	3,51	3,44	3,41	3,38	3,34	3,30	3,27	3,23
8	5,32	4,46	4,07	3,84	3,69	3,58	3,50	3,44	3,39	3,35	3,28	3,22	3,15	3,12	3,08	3,04	3,01	2,97	2,93
9	5,12	4,26	3,86	3,63	3,48	3,37	3,29	3,23	3,18	3,14	3,07	3,01	2,94	2,90	2,86	2,82	2,79	2,75	2,71
10	4,96	4,10	3,71	3,48	3,33	3,22	3,14	3,07	3,02	2,98	2,91	2,85	2,77	2,74	2,70	2,66	2,62	2,58	2,54
11	4,84	3,98	3,59	3,36	3,20	3,09	3,01	2,95	2,90	2,85	2,79	2,72	2,65	2,61	2,57	2,53	2,49	2,45	2,40
12	4,75	3,89	3,49	3,26	3,11	3,00	2,91	2,85	2,80	2,75	2,69	2,62	2,54	2,51	2,47	2,43	2,38	2,34	2,30
13	4,67	3,81	3,41	3,18	3,03	2,92	2,83	2,77	2,71	2,67	2,60	2,53	2,46	2,42	2,38	2,34	2,29	2,25	2,21
14	4,60	3,74	3,34	3,11	2,96	2,85	2,76	2,70	2,65	2,60	2,53	2,46	2,39	2,35	2,31	2,27	2,22	2,18	2,13
15	4,54	3,68	3,29	3,06	2,90	2,79	2,71	2,64	2,59	2,54	2,48	2,40	2,33	2,29	2,25	2,20	2,16	2,11	2,07
16	4,49	3,63	3,24	3,01	2,85	2,74	2,66	2,59	2,54	2,49	2,42	2,35	2,28	2,24	2,19	2,15	2,11	2,06	2,01
17	4,45	3,59	3,20	2,96	2,81	2,70	2,61	2,55	2,49	2,45	2,38	2,31	2,23	2,19	2,15	2,10	2,06	2,01	1,96
18	4,41	3,55	3,16	2,93	2,77	2,66	2,58	2,51	2,46	2,41	2,34	2,27	2,19	2,15	2,11	2,06	2,02	1,97	1,92
19	4,38	3,52	3,13	2,90	2,74	2,63	2,54	2,48	2,42	2,38	2,31	2,23	2,16	2,11	2,07	2,03	1,98	1,93	1,88
20	4,35	3,49	3,10	2,87	2,71	2,60	2,51	2,45	2,39	2,35	2,28	2,20	2,12	2,08	2,04	1,99	1,95	1,90	1,84
21	4,32	3,47	3,07	2,84	2,68	2,57	2,49	2,42	2,37	2,32	2,25	2,18	2,10	2,05	2,01	1,96	1,92	1,87	1,81
22	4,30	3,44	3,05	2,82	2,66	2,55	2,46	2,40	2,34	2,30	2,23	2,15	2,07	2,03	1,98	1,94	1,89	1,84	1,78
23	4,28	3,42	3,03	2,80	2,64	2,53	2,44	2,37	2,32	2,27	2,20	2,13	2,05	2,01	1,96	1,91	1,86	1,81	1,76
24	4,26	3,40	3,01	2,78	2,62	2,51	2,42	2,36	2,30	2,25	2,18	2,11	2,03	1,98	1,94	1,89	1,84	1,79	1,73
25	4,24	3,39	2,99	2,76	2,60	2,49	2,40	2,34	2,28	2,24	2,16	2,09	2,01	1,96	1,92	1,87	1,82	1,77	1,71
26	4,23	3,37	2,98	2,74	2,59	2,47	2,39	2,32	2,27	2,22	2,15	2,07	1,99	1,95	1,90	1,85	1,80	1,75	1,69
27	4,21	3,35	2,96	2,73	2,57	2,46	2,37	2,31	2,25	2,20	2,13	2,06	1,97	1,93	1,88	1,84	1,79	1,73	1,67
28	4,20	3,34	2,95	2,71	2,56	2,45	2,36	2,29	2,24	2,19	2,12	2,04	1,96	1,91	1,87	1,82	1,77	1,71	1,65
29	4,18	3,33	2,93	2,70	2,55	2,43	2,35	2,28	2,22	2,18	2,10	2,03	1,94	1,90	1,85	1,81	1,75	1,70	1,64
30	4,17	3,32	2,92	2,69	2,53	2,42	2,33	2,27	2,21	2,16	2,09	2,01	1,93	1,89	1,84	1,79	1,74	1,68	1,62
40	4,08	3,23	2,84	2,61	2,45	2,34	2,25	2,18	2,12	2,08	2,00	1,92	1,84	1,79	1,74	1,69	1,64	1,58	1,51
60	4,00	3,15	2,76	2,53	2,37	2,25	2,17	2,10	2,04	1,99	1,92	1,84	1,75	1,70	1,65	1,59	1,53	1,47	1,39
120	3,92	3,07	2,68	2,45	2,29	2,17	2,09	2,02	1,96	1,91	1,83	1,75	1,66	1,61	1,55	1,49	1,43	1,35	1,25
∞	3,84	3,00	2,60	2,37	2,21	2,10	2,01	1,94	1,88	1,83	1,75	1,67	1,57	1,52	1,46	1,39	1,32	1,22	1,00

ϕ_1 – Graus de liberdade do numerador; ϕ_2 – Graus de liberdade do denominador

Fonte: CALEGARE (2009)