

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

PABLO DEIVID VALLE

**INVESTIGAÇÃO TEÓRICO – EXPERIMENTAL DOS ESFORÇOS DE
CONFORMAÇÃO MECÂNICA NA ESTAMPAGEM INCREMENTAL
ASSIMÉTRICA POR PONTO ÚNICO EM CENTROS DE USINAGEM**

CURITIBA

2016

PABLO DEIVID VALLE

**INVESTIGAÇÃO TEÓRICO – EXPERIMENTAL DOS ESFORÇOS DE
CONFORMAÇÃO MECÂNICA NA ESTAMPAGEM INCREMENTAL
ASSIMÉTRICA POR PONTO ÚNICO EM CENTROS DE USINAGEM**

Tese de Doutorado apresentada como requisito para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Mecânica do curso de doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Paraná, na área de concentração Manufatura.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Victor P. Marcondes

Coorientador: Prof. Dr. Fred Lacerda Amorim

CURITIBA

2016

V181i

Valle, Pablo Deivid

Investigação teórico – experimental dos esforços de conformação mecânica na estampagem incremental assimétrica por ponto único em centros de usinagem / Pablo Deivid Valle. – Curitiba, 2016.
269 f. : il. color. ; 30 cm.

Tese - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2016.

Orientador: Paulo Victor Prestes Marcondes – Co-orientador: Fred Lacerda Amorim.

Bibliografia: p. 237-241.

1. Chapas de aço. 2. Chapas de Metal. 3. Estampagem (Metais). 4. Metalografia. I. Universidade Federal do Paraná. II. Marcondes, Paulo Victor Prestes. III. Amorim, Fred Lacerda. IV. Título.

CDD: 669.9



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
Setor TECNOLOGIA
Programa de Pós Graduação em ENGENHARIA MECÂNICA
Código CAPES: 40001016040P5

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA MECÂNICA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Tese de Doutorado de **PABLO DEIVID VALLE**, intitulada: "**INVESTIGAÇÃO TEÓRICO-EXPERIMENTAL DOS ESFORÇOS DE CONFORMAÇÃO MECÂNICA NA ESTAMPAGEM INCREMENTAL ASSIMÉTRICA POR PONTO ÚNICO EM CENTROS DE USINAGEM**", após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua

Aprovação

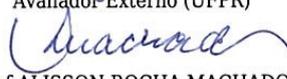
Curitiba, 29 de Agosto de 2016.


Prof PAULO VICTOR PRESTES MARCONDES
Presidente da Banca Examinadora (UFPR)


Prof LIRIO SCHAEFER
Avaliador Externo (UFRGS)


Prof SACHIKO ARAKI LIRA
Avaliador Externo (UFPR)


Prof SERGIO LUIZ HENKE
Avaliador Externo (UFPR)


Prof ALISSON ROCHA MACHADO
Avaliador Externo (PUC/PR)

DEDICATÓRIA

À Deus.

À minha amada esposa Mirela, pelo imenso apoio e amor.

À minha mãe Ivanilde, ao meu pai Vanildo, minha irmã Emanuele e cunhado Dionei, pelo incentivo e compreensão ao longo desse anos.

À minha nona Alice, ao nono Luiz (*in memoriam*), à nona Celestina (*in memoriam*) e ao nono Eugênio (*In memoriam*).

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Paraná pelo constante incentivo à qualificação do seu quadro de docentes.

Ao prof. Paulo Victor Prestes Marcondes, pela orientação acadêmica e amizade.

Ao prof. Fred Lacerda Amorim, pela coorientação acadêmica e amizade.

Ao prof. Dalberto Dias da Costa, pelo apoio prestado e amizade.

Ao prof. Nixon Vieira Malveira, pelo apoio prestado e amizade.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e ao secretário Marcio Brandani Tenório.

RESUMO

A tecnologia ISF (Incremental Sheet Forming) se destaca, sobretudo, por utilizar centro de usinagem tradicional para a produção de pequenos lotes de estampados, de protótipos ou de produtos customizados. E, eventuais forças excessivas no decorrer do processo podem comprometer a integridade da máquina, ultrapassar o limite mecânico do punção ou imprimir danos ao componente em processamento. Assim sendo, a modelagem matemática experimental dos esforços que ocorrem durante a deformação da chapa, torna-se, essencial para a análise técnica/financeira do referido processo. Caso contrário, seria necessário a utilização do processo convencional por intermédio de matrizes e prensas de grande porte, acarretando, possivelmente, maiores custos e tempos. Desse modo, este trabalho teórico-experimental apresenta o Delineamento de Experimentos (DOE) para a investigação do comportamento das forças de conformação mecânica – F_x , F_y e F_z – no processo de estampagem incremental assimétrica em máquinas CNC, e com ponto único de contato – SPIF – (*Single Point Incremental Forming*). O principal objetivo foi a concepção da função matemática, por meio da análise de regressão, que melhor representa o modelo teórico da força atuante nesse fenômeno, ou seja, o equacionamento proposto neste trabalho permite, em especial, estimar as cargas máximas presentes na deformação da peça, F_z _pico e FR, nas direções X, Y e Z, a partir dos principais fatores. Os quais: diâmetro da ferramenta d_t (mm); ângulo de inclinação da parede α ($^\circ$); espessura da chapa metálica t (mm); incremento vertical Δz (mm); e avanço do punção f (mm/min). A ferramenta foi de metal-duro K40, revestida por carbonitreto de titânio alumínio (AlTiCN), e a chapa de aço comercial ASTM A653 CS-A G90. O método estatístico escolhido foi o fatorial 2^5 completo, com intervalo de confiança fixado em 99% e, ademais, testado o ponto central para averiguar a respectiva linearidade. Dentre os 5 fatores investigados conclui-se: o avanço f não é significativo e pode ser maximizado para a redução do tempo de produção; o diâmetro do punção d_t e a inclinação da parede α são significativos e com leve influência sobre a força; o incremento vertical Δz é significativo com moderada influência sobre a força e, sobretudo, é o parâmetro de processo que deve, primeiramente, ser manipulado para a viabilização da tecnologia; e, por fim, a espessura da chapa t que, naturalmente, é significativa, porém, é especificada pela área de projeto e, nesse sentido, com pouquíssima margem de ajuste. Logo, o principal parâmetro de processo para a otimização da tecnologia ISF tende a ser o incremento vertical, Δz .

Palavras-chaves: Estampagem Incremental Assimétrica de Chapas (ISF). Forças de Deformação. Modelo Matemático Experimental.

ABSTRACT

The ISF technology (Incremental Sheet Forming) stands out mainly by using traditional machining center for the production of small batches of parts, prototypes or customized products. And any excessive force in the process may compromise the integrity of the machine, the punch or even could damage the compenente. Thus, experimental mathematical modeling efforts that occur during deformation of the sheet, is essential for technical / financial analysis of ISF process. Otherwise, the use of conventional process by dies and presses would be required, resulting in possibly increased costs and times. This theoretical and experimental work presents the Design of Experiments (DOE) to investigate the behavior of mechanical forming forces - F_x , F_y and F_z - in the process of asymmetric incremental stamping on CNC machines, with single point of contact - SPIF - (Single Point Incremental Forming). The primary objective was to design the mathematical function by means of regression analysis that best represents the theoretical model of force acting in this phenomenon, ie the equation proposed here allows, in particular, to estimate the maximum loads present in deformation piece F_z _pico and FR, in the directions X, Y and Z. Where as the main factors: d_t tool diameter (mm); wall angle α ($^\circ$); thickness of metal sheet t (mm); vertical increment Δz (mm); and feed of the punch f (mm/min). The tool was a carbide-K40, coated with titanium aluminum carbonitride (AlTiCN), and commercial sheet steel ASTM A653 The CS-G90 was applied. The statistical method chosen was the complete factor 2^5 with confidence interval set at 99% and, in addition, tested the central point to observe its linearity. Among the five factors investigated follows: the feed rate f is not significant and can be maximized for reducing production time; the diameter d_t and wall angle α are significant and it has slight influence on the forces; the vertical increment Δz is significant with moderate influence on the force, and above all, is the process parameter that must first be manipulated to the viability of the technology; and, finally, the sheet thickness t , of course, is significant, however, is specified by the project area and, accordingly, with very little adjustment range. Therefore, the main process parameter for optimizing the ISF technology tends to be the vertical increment Δz .

Keywords: Incremental Sheet Forming. Forming Force. Experimental Mathematical Model.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	- Aplicação de software CAM na geração do percurso do punção em ISF.....	25
FIGURA 2	- Exemplo do processo de estampagem incremental de chapas (ISF).....	26
FIGURA 3	- Caracterização das forças de conformação nas direções x, y e z e da FR.....	27
FIGURA 4	- Área circunferencial sujeita a trincas.....	28
FIGURA 5	- Centro de usinagem e dinamômetro Kistler tipo 9129AA para aquisição de cargas.....	32
FIGURA 6	- Exemplo de aplicação da tecnologia ISF na obtenção de próteses.....	34
FIGURA 7	- Geração da trajetória CAD e a estampagem incremental em centros CNC.....	35
FIGURA 8	- Braços robóticos ABB atuando, sincronizadamente, no processo TPIF.....	36
FIGURA 9	- Estampagens convexa e côncava.....	38
FIGURA 10	- Conformação incremental, características importantes.....	39
FIGURA 11	- Variantes do processo de conformação incremental assimétrica.....	39
FIGURA 12	- Conformação negativa (A) e conformação positiva (B).....	42
FIGURA 13	- Esquema representativo da conformação incremental com suporte estático.....	43
FIGURA 14	- Esquema de estampagem incremental por dois pontos com matriz dedicada.....	44
FIGURA 15	- Estampagem CISF: (a) – SPIF e (b) – TPIF.....	46
FIGURA 16	- (a) Matriz parcial TPIFPD, (b) Matriz completa TPIFFD e (c) Pressurizada SPIHF	47
FIGURA 17	- Classificação do Processo de Estampagem Incremental de Chapas.....	48
FIGURA 18	- Mecanismo de deformação associado ao processo ISF.....	48
FIGURA 19	- Características do processo ISF por ponto único, FC sem rotação.....	50
FIGURA 20	- Representação das direções dos corpos de prova na chapa laminada.....	50
FIGURA 21	- Zonas de deformação em ISF e linha de fluxo do material.....	52
FIGURA 22	- Tendências nas forças de estampagem incremental de chapas – ISF.....	53
FIGURA 23	- Esforços na estampagem incremental nas direções Fx, Fy e Fz.....	54
FIGURA 24	- Especificações técnicas do dispositivo ISF piloto (SAE 4140, tratado termicamente).....	56
FIGURA 25	- Punção semiesférico utilizado no ensaio piloto, diâmetro 5mm.....	57
FIGURA 26	- Dispositivo ISF piloto montado sobre a mesa da máquina CNC.....	58
FIGURA 27	- Corpos de prova utilizados no ensaio piloto, geometria circular com $\phi=70\text{mm}$	58
FIGURA 28	- Sequência de deformação cônica impressa no corpo de prova.....	59
FIGURA 29	- Etapas do ensaio preliminar.....	60
FIGURA 30	- Corpos de prova em aço ASTM A653 CS-A G90 deformados no ensaio preliminar.....	62
FIGURA 31	- Punção de $\phi=4\text{mm}$ quebrado no decorrer dos testes preliminares.....	62
FIGURA 32	- Gráfico de forças esperado, modelo linear e modelo polinomial; CP_teste 3.....	65
FIGURA 33	- Quadro de apoio à tomada de decisão no decorrer do ensaio preliminar.....	66

FIGURA 34	- (a) frente da chapa CP_26, (b) verso com a representação da secção para amostra.....	69
FIGURA 35	- Metalografia das chapas de aço: (a) Chapa t=0,43mm; (b) Chapa t=0,80mm.....	69
FIGURA 36	- (a) CP do ensaio de tração; (b) Montagem na garra da máquina.....	70
FIGURA 37	- FIGURA 37 - Durômetro Rockwell Versitron®.....	73
FIGURA 38	- Microscópio Ótico Olympus BX51.....	73
FIGURA 39	- Gráfico boxplot das amostras de dureza das chapas ASTM A653 CS-A.....	74
FIGURA 40	- Exemplo de guilhotina utilizada no recorte das chapas com geometria quadrada.....	75
FIGURA 41	- Dispositivo ISF para fixação da chapa de geometria quadrada 70mm por 70mm.....	76
FIGURA 42	- Punção semiesférico montado no mandril, ampliação 2 vezes.....	77
FIGURA 43	- Sistema hexapod utilizado pela FORD para impressão ISF 3D.....	78
FIGURA 44	- Modelagem dos 3 diâmetros d_t das ferramentas, para os 3 ângulos de parede α	80
FIGURA 45	- Pinças ER 32 utilizadas para a rígida fixação dos punções.....	81
FIGURA 46	- Sistema punção/pinça/mandril para os 3 diâmetros d_t das ferramentas..	81
FIGURA 47	- Comprimento em balanço para os 3 diâmetros d_t das ferramentas.....	82
FIGURA 48	- Dispositivo ISF final montado sobre a mesa da máquina ROMI DISCOVERY 4022.....	83
FIGURA 49	- Painel de controle MACH 9 do centro de usinagem ROMI DISCOVERY 4022.....	84
FIGURA 50	- Exemplo de programa NC para controle da movimentação do punção em G2.....	85
FIGURA 51	- Número do programa para cada combinação ângulo de parede e incremento em Z.....	86
FIGURA 52	- Sequência de preparação e calibração do dispositivo ISF sobre a mesa da máquina.....	87
FIGURA 53	- Aspectos tecnológicos do dinamômetro piezoelétrico Kistler tipo 9129AA.....	88
FIGURA 54	- Princípio funcional dos cristais piezoelétricos.....	89
FIGURA 55	- Máxima distância ao ponto de medição.....	90
FIGURA 56	- Amplificador de sinal multicanal 5070A_000-485e.....	91
FIGURA 57	- Sistema de aquisição dos dados, computador, amplificador de sinal e máquina.....	91
FIGURA 58	- Tela de ajuste e calibração do sistema de aquisição de força.....	92
FIGURA 59	- Especificações técnicas do dispositivo ISF final.....	94
FIGURA 60	- Aspectos construtivos do dispositivo ISF.....	95
FIGURA 61	- Ajustes na altura da base e na quantidade de parafusos para o dispositivo ISF.....	95
FIGURA 62	- Sequência de troca rápida dos corpos de prova.....	96
FIGURA 63	- Bloco de notas com os dados brutos gerados em <i>Volts</i> no decorrer do ensaio.....	98
FIGURA 64	- Representação do zero ferramenta, ponto de início de deformação e zero peça.....	99
FIGURA 65	- Principais parâmetros de processo na conformação incremental de chapas.....	100

FIGURA 66	- Tela principal do software Minitab com o arranjo fatorial completo 2 ⁵ montado.....	102
FIGURA 67	- Principais etapas no processo de realização dos testes.....	106
FIGURA 68	- Intervalo de aquisição dos esforços Fx, Fy e Fz; CP32 , P7.....	108
FIGURA 69	- Região útil dos esforços Fx, Fy e Fz; CP32 , P7.....	109
FIGURA 70	- Pontos inicial e final que definem o percurso de aquisição de Fz; CP32, P7.....	110
FIGURA 71	- Região útil para determinação dos esforços médios; CP32 , P7.....	111
FIGURA 72	- Comportamento médio dos esforços Fx, Fy e Fz; CP32 , P7.....	113
FIGURA 73	- Representação das forças médias Fxy, Fz_médio e FR; CP32 , P7.....	114
FIGURA 74	- Sistemática de apresentação dos resultados obtidos por fator principal..	118
FIGURA 75	- Comportamento dos esforços em Fz nos 7 passes para o tratamento (1), CP1.....	124
FIGURA 76	- Comportamento dos esforços em Fx, Fy e Fxy no passe 7 para o tratamento (1), CP1.....	125
FIGURA 77	- Comportamento do esforço Fz ao longo de 7 passes para o tratamento (1), CP1.....	126
FIGURA 78	- Análise de regressão do modelo para o Trat. (1) nas 3 repetições; CP1, CP33 e CP65.....	127
FIGURA 79	- Comportamento dos esforços em Fz nos 7 passes para o Trat. “bcde”, CP31.....	129
FIGURA 80	- Comportamento dos esforços em Fx, Fy e Fxy no passe 7 para o Trat. “bcde”, CP31.....	129
FIGURA 81	- Comportamento do esforço Fz ao longo de 7 passes para o Trat. “bcde”, CP31.....	130
FIGURA 82	- Análise de regressão para o Trat. “bcde” nas 3 repetições;CP31,CP63 e CP95.....	131
FIGURA 83	- Comportamento dos esforços em Fz nos 7 passes para o Trat. Central, CP97.....	135
FIGURA 84	- Comportamento dos esforços em Fx, Fy e Fxy no passe 7 para o Trat. central, CP97.....	135
FIGURA 85	- Comportamento do esforço Fz ao longo de 7 passes para o Trat. central, CP97.....	136
FIGURA 86	- Comportamento dos esforços em Fz nos 7 passes para o Trat. Central, CP98.....	137
FIGURA 87	- Comportamento dos esforços em Fx, Fy e Fxy no passe 7 para o Trat. central, CP98.....	137
FIGURA 88	- Comportamento do esforço Fz ao longo de 7 passes para o Trat. central, CP98.....	138
FIGURA 89	- Análise de regressão do modelo para o Trat. central nas 10 repetições; CP97 a CP106.....	139
FIGURA 90	- Comportamento dos esforços em Fz nos 7 passes para o Trat. “abcde”, CP32.....	144
FIGURA 91	- Comportamento dos esforços em Fx, Fy e Fxy no passe 7 para o Trat. “abcde”, CP32.....	144
FIGURA 92	- Comportamento do esforço Fz ao longo de 7 passes para o Trat. “abcde”, CP32.....	145
FIGURA 93	- Análise de regressão do modelo para o Trat. a nas 3 repetições; CP32, CP64 e CP96.....	146
FIGURA 94	- Comportamento dos esforços em Fz nos 7 passes para o Trat. a, CP2...	148

FIGURA 95 -	Comportamento dos esforços em Fx, Fy e Fxy no passe 7 para o Trat. a, CP2.....	148
FIGURA 96 -	Comportamento do esforço Fz ao longo de 7 passes para o Trat. a, CP2.....	149
FIGURA 97 -	Análise de regressão do modelo para o Trat. “a” nas 3 repetições; CP2, CP34 e CP66.....	150
FIGURA 98 -	Comportamento dos esforços em Fz nos 7 passes para o Trat. “acde”, CP62.....	152
FIGURA 99 -	Comportamento dos esforços em Fx, Fy e Fxy no passe 7 para o Trat. “acde”, CP62.....	152
FIGURA 100 -	Análise de regressão do modelo para o Trat. “acde” nas 3 rep.;CP30, CP62 e CP94.....	153
FIGURA 101 -	Comportamento dos esforços em Fz nos 6 passes para o Trat. central, CP99.....	155
FIGURA 102 -	Comportamento dos esforços em Fx, Fy e Fxy no passe 6 para o Trat. central, CP99.....	155
FIGURA 103 -	Comportamento dos esforços em Fz nos 7 passes para o Trat. central, CP100.....	156
FIGURA 104 -	Comportamento dos esforços em Fx, Fy e Fxy no passe 7 para o Trat. central, CP100.....	156
FIGURA 105 -	Comportamento dos esforços em Fz nos 7 passes para o Trat. “b”, CP35.....	158
FIGURA 106 -	Comportamento dos esforços em Fx, Fy e Fxy no passe 7 para o Trat. “b”, CP35.....	158
FIGURA 107 -	Análise de regressão do modelo para o Trat. “b” nas 3 rep.; CP3, CP35 e CP67.....	159
FIGURA 108 -	Comportamento dos esforços em Fz nos 7 passes para o Trat. “abde”, CP92.....	161
FIGURA 109 -	Comportamento dos esforços em Fx, Fy e Fxy no passe 7 para o Trat. “abde”, CP92.....	161
FIGURA 110 -	Análise de regressão do modelo para o Trat. “abde” nas 3 rep.; CP28, CP60 e CP92.....	162
FIGURA 111 -	Comportamento dos esforços em Fz nos 7 passes para o Trat. central, CP101.....	163
FIGURA 112 -	Comportamento dos esforços em Fx, Fy e Fxy no passe 7 para o Trat. central, CP101.....	163
FIGURA 113 -	Comportamento dos esforços em Fz nos 7 passes para o Trat. central, CP102.....	164
FIGURA 114 -	Comportamento dos esforços em Fx, Fy e Fxy no passe 7 para o Trat. central, CP102.....	164
FIGURA 115 -	Comportamento dos esforços em Fz nos 7 passes para o Trat. “c”, CP69.....	166
FIGURA 116 -	Comportamento dos esforços em Fx, Fy e Fxy no passe 7 para o Trat. “c”, CP7.....	166
FIGURA 117 -	Análise de regressão do modelo para o Trat. “c” nas 3 rep.; CP5, CP37 e CP69.....	167
FIGURA 118 -	Comportamento dos esforços em Fz nos 7 passes para o Trat. “abce”, CP24.....	169
FIGURA 119 -	Comportamento dos esforços em Fx, Fy e Fxy no passe 7 para o Trat. “abce”, CP24.....	169

FIGURA 120 -	Análise de regressão do modelo para o Trat. “abce” nas 3 rep.; CP24, CP56 e CP88.....	170
FIGURA 121 -	Comportamento dos esforços em Fz nos 7 passes para o Trat. central, CP103.....	171
FIGURA 122 -	Comportamento dos esforços em Fx, Fy e Fxy no passe 7 para o Trat. central, CP103.....	171
FIGURA 123 -	Comportamento dos esforços em Fz nos 7 passes para o Trat. central, CP104.....	172
FIGURA 124 -	Comportamento dos esforços em Fx, Fy e Fxy no passe 7 para o Trat. central, CP104.....	172
FIGURA 125 -	Comportamento dos esforços em Fz nos 7 passes para o Trat. “d”, CP9.....	174
FIGURA 126 -	Comportamento dos esforços em Fx, Fy e Fxy no passe 7 para o Trat. “d”, CP9.....	174
FIGURA 127 -	Análise de regressão do modelo para o Trat. “d” nas 3 rep.; CP9, CP41 e CP73.....	175
FIGURA 128 -	Comportamento dos esforços em Fz nos 7 passes para o Trat. “abcd”, CP48.....	177
FIGURA 129 -	Comportamento dos esforços em Fx, Fy e Fxy no passe 7 para o Trat. “abcd”, CP48.....	177
FIGURA 130 -	Análise de regressão do modelo para o Trat. “abcd” nas 3 rep.; CP16, CP48 e CP80.....	178
FIGURA 131 -	Comportamento dos esforços em Fz nos 7 passes para o Trat. central, CP105.....	179
FIGURA 132 -	Comportamento dos esforços em Fx, Fy e Fxy no passe 7 para o Trat. central, CP105.....	179
FIGURA 133 -	Comportamento dos esforços em Fz nos 7 passes para o Trat. central, CP106.....	180
FIGURA 134 -	Comportamento dos esforços em Fx, Fy e Fxy no passe 7 para o Trat. central, CP106.....	180
FIGURA 135 -	Comportamento dos esforços em Fz nos 7 passes para o Trat. “e”, CP49.....	182
FIGURA 136 -	Comportamento dos esforços em Fx, Fy e Fxy no passe 7 para o Trat. “e”, CP49.....	182
FIGURA 137 -	Análise de regressão do modelo para o Trat. “e” nas 3 rep.; CP17, CP49 e CP81.....	183
FIGURA 138 -	Tela principal do Minitab com as variáveis do DOE.....	185
FIGURA 139 -	Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados, Fz_pico, P7.....	186
FIGURA 140 -	Gráfico normal dos efeitos padronizados, Fz_pico, P7.....	187
FIGURA 141 -	Gráfico de efeitos principais “f”, Fz_pico, P7.....	189
FIGURA 142 -	Gráfico de efeitos principais “t”, Fz_pico, P7.....	191
FIGURA 143 -	Gráfico de efeitos principais “ Δz ”, Fz_pico, P7.....	191
FIGURA 144 -	Gráfico de contraste dos níveis com espessura fixa em (-1), t=0,43mm.	192
FIGURA 145 -	Gráfico de contraste dos níveis com espessura fixa em (+1), t=0,80mm.....	192
FIGURA 146 -	Gráfico de contraste dos níveis com incremento z em (-1), $\Delta z=0,40\text{mm}$	194
FIGURA 147 -	Gráfico de contraste dos níveis com incremento z em (+1), $\Delta z=0,80\text{mm}$	195
FIGURA 148 -	Gráfico de efeitos principais “d _t ”, Fz_pico, P7.....	195

FIGURA 149 -	Gráfico de efeitos principais “ α ”, Fz_pico, P7.....	196
FIGURA 150 -	Gráfico de contraste dos níveis com diâmetro do punção em (-1), $d_t=5,0\text{mm}$	196
FIGURA 151 -	Gráfico de contraste dos níveis com diâmetro do punção em (+1), $d_t=8,0\text{mm}$	197
FIGURA 152 -	Gráfico de contraste dos níveis com ângulo de parede em (-1), $\alpha=40^\circ$...	199
FIGURA 153 -	Gráfico de contraste dos níveis com ângulo de parede em (+1), $\alpha=60^\circ$..	199
FIGURA 154 -	Gráfico de interação para “t” e “ Δz ”, Fz_pico, P7.....	200
FIGURA 155 -	Gráfico de interação para “ d_t ” e “ Δz ”, Fz_pico, P7.....	201
FIGURA 156 -	Gráfico de interação para α e Δz , Fz_pico, P7.....	202
FIGURA 157 -	Gráfico de interação para “ α ” e “t”, Fz_pico, P7.....	204
FIGURA 158 -	Gráfico de interação para “ d_t ” e “t”, Fz_pico, P7.....	204
FIGURA 159 -	Gráfico de resíduos <i>versus</i> ordem de observação R1, Fz_pico, P7.....	206
FIGURA 160 -	Gráfico de resíduos <i>versus</i> o valor ajustado R1, Fz_pico, P7.....	207
FIGURA 161 -	Gráfico de histograma para os resíduos R1, Fz_pico, P7.....	208
FIGURA 162 -	Gráfico de probabilidade normal dos resíduos R1, Fz_pico, P7.....	209
FIGURA 163 -	Gráfico de probabilidade normal dos resíduos R2, Fz_pico, P7.....	210
FIGURA 164 -	Gráfico de probabilidade normal dos resíduos R3, Fz_pico, P7.....	211
FIGURA 165 -	Gráfico de probabilidade normal dos resíduos R4, Fz_pico, P7.....	211
FIGURA 166 -	Gráfico de resíduos <i>versus</i> o valor ajustado R4, Fz_pico, P7.....	212
FIGURA 167 -	Gráfico de resíduos <i>versus</i> o valor ajustado R4, Fz_pico, P7.....	213
FIGURA 168 -	Gráfico de histograma para os resíduos R4, Fz_pico, P7.....	213
FIGURA 169 -	Gráfico de resíduos <i>versus</i> o valor ajustado R4, Fz_pico, P7.....	215
FIGURA 170 -	Estampagem incremental simulada por intermédio do ambiente Abaqus ®.....	216
FIGURA 171 -	Malha de círculos gravada por foto-corrosão e ISF em progresso “h”; $t=0,43\text{mm}$	219
FIGURA 172 -	Corpos de prova deformados com $d_t=5\text{mm}$ e; (a) $\Delta z=0,4\text{mm}$; (b) $\Delta z=0,8\text{mm}$	220
FIGURA 173 -	Corpos de prova deformados com $d_t=8\text{mm}$ e; (a) $\Delta z=0,4\text{mm}$; (b) $\Delta z=0,8\text{mm}$	221
FIGURA 174 -	Corpos de prova deformados com $d_t=6\text{mm}$ e $\Delta z=0,6\text{mm}$	222
FIGURA 175 -	Gráfico de cubo (médias ajustadas), Fz_pico, P7.....	224
FIGURA 176 -	Ferramenta conjugada, haste e ponta semiesférica.....	227
FIGURA 177 -	Fluxograma para tomada de decisão em ISF com CNC.....	229
FIGURA 178 -	Diferença na performance do processo ISF em termos do passe no eixo z, “ Δz ”.....	234

LISTA DE TABELAS

TABELA 1	- Arranjo experimental do ensaio preliminar.....	61
TABELA 2	- Exemplo de esforços mapeados no ensaio piloto de forças.....	64
TABELA 3	- Arranjo experimental final do ensaio fatorial 25.....	66
TABELA 4	- Composição química do material de base.....	67
TABELA 5	- Características do revestimento para as chapas 0,43mm e 0,80mm.....	68
TABELA 6	- Composição em peso do revestimento galvalume para a chapa 0,65mm.	68
TABELA 7	- Propriedades de Estampabilidade do CP ASTM A653 CS-A G90.	71
TABELA 8	- Propriedades mecânicas do aço ASTM A653 CS-A G90.....	71
TABELA 9	- Propriedades da lei de potência na direção de laminação 0° do aço ASTM A653 CS-A G90.....	72
TABELA 10	- Dureza das chapas ASTM A653 CS-A.....	74
TABELA 11	- Características físicas e químicas do material do punção.....	79
TABELA 12	- Dados técnicos do cone porta punção.....	81
TABELA 13	- Especificações técnicas do centro de usinagem CNC ROMI DISCOVERY, modelo 4022.....	84
TABELA 14	- Ações e tempos no processo de troca rápida do corpo de prova.....	96
TABELA 15	- Tabela de sinais fatoriais para um experimento fatorial 25.....	101
TABELA 16	- Arranjo experimental dos 106 testes com 3 repetições no planejamento fatorial 25.....	103
TABELA 17	- Valores dos fatores principais de processo e seus respectivos níveis.....	104
TABELA 18	- Sequência programada para realização dos ensaios com o respectivo teste fatorial associado.....	104
TABELA 19	- Roteiro para realização dos ciclos de experimentação.....	105
TABELA 20	- Exemplo de quadro padrão para registro das variáveis respostas, Fz_pico, Fz_med, Fxy e FR.....	115
TABELA 21	- Organização da apresentação dos tratamentos por fator principal.....	116
TABELA 22	- Resultados obtidos dos esforços para o fator diâmetro do punção dt=5mm.....	120
TABELA 23	- Médias dos esforços Fz_pico, FR, Fz_médio e Fxy para as 3 repetições no tratamento (1).....	123
TABELA 24	- Posição dos esforços mínimos e máximos em X e Y ao longo do movimento circular horário do punção.....	126
TABELA 25	- Médias dos esforços Fz_pico, FR, Fz_médio e Fxy para as 3 repetições no tratamento “bcde”.....	128
TABELA 26	- Resultados obtidos dos esforços para o fator diâmetro do punção dt=6mm.....	132
TABELA 27	- Médias Fz_pico, FR, Fz_médio e Fxy para as 10 repetições no trat. central.....	133
TABELA 28	- Resultados obtidos para o fator principal diâmetro do punção dt=8mm.	140
TABELA 29	- Médias dos esforços Fz_pico, FR, Fz_médio e Fxy para as 3 repetições no tratamento “bcde”.....	143
TABELA 30	- Médias dos esforços Fz_pico, FR, Fz_médio e Fxy para as 3 repetições no tratamento “a”.....	147
TABELA 31	- Médias dos esforços Fz_pico, FR, Fz_médio e Fxy para as 3 repetições no tratamento “acde”.....	151
TABELA 32	- Médias dos esforços Fz_pico, FR, Fz_médio e Fxy para as 3 repetições no tratamento “b”.....	157

TABELA 33 - Médias dos esforços Fz_pico, FR, Fz_médio e Fxy para as 3 repetições no tratamento “abde”	160
TABELA 34 - Médias dos esforços Fz_pico, FR, Fz_médio e Fxy para as 3 repetições no tratamento “c”	165
TABELA 35 - Médias dos esforços Fz_pico, FR, Fz_médio e Fxy para as 3 repetições no tratamento “abce”	168
TABELA 36 - Médias dos esforços Fz_pico, FR, Fz_médio e Fxy para as 3 repetições no tratamento “d”	173
TABELA 37 - Médias dos esforços Fz_pico, FR, Fz_médio e Fxy para as 3 repetições no tratamento “abcd”	176
TABELA 38 - Médias dos esforços Fz_pico, FR, Fz_médio e Fxy para as 3 repetições no tratamento “e”	181
TABELA 39 - Termos significativos obtidos por intermédio da análise DOE, 25.....	188
TABELA 40 - Organização dos subtópicos conforme semelhança do.....	188
TABELA 41 - Comparação dos 3 outliers com as respectivas repetições experimentais.....	207
TABELA 42 - Parâmetros assumidos para a simulação numérica em curso.....	216
TABELA 43 - Modelagem dos experimentos para a devida simulação computacional.	217
TABELA 44 - Níveis dos fatores “ \square_z hmáx”	218
TABELA 45 - Arranjo experimental dos 9 tratamentos e 3 repetições do ensaio complementar para hmáx.....	218

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AHSS	Advanced High Strength Steel
ASTM	American Society for Testing and Materials
CISF	Conventional Incremental Sheet Forming
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CAE	Computer Aided Engineering
CNC	Comando Numérico Computadorizado
CSN	Compania Siderúrgica Nacional
DOE	Design of Experiments
FC	Ferramenta de Conformação
FE	Finite Element
FEA	Finite Element Analysis
FEM	Finite Element Method
HISF	Hybrid Incremental Sheet Forming
ISF	Incremental Sheet Forming
LAMATS	Laboratório de Materiais e Superfícies
SPIF	Single-Point Incremental Forming
SPIHF	Single-Point Incremental Hydro-Forming
TPIF	Two-Point Incremental Forming
TPIFPD	Two-Point Incremental Forming with Partial Die
TPIFFD	Two-Point Incremental Forming with Full Die
UFPR	Universidade Federal do Paraná

LISTA DE SÍMBOLOS

α	[°]	Ângulo de parede
α_1	[°]	Ângulo de parede medido
Δr	-	Anisotropia planar
r_{0°	-	Anisotropia na direção de laminação 0°
r_{45°	-	Anisotropia na direção de laminação 45°
r_{90°	-	Anisotropia na direção de laminação 90°
R11	-	Taxa de tensão para escoamento anisotrópico
R22	-	Taxa de tensão para escoamento anisotrópico
R33	-	Taxa de tensão para escoamento anisotrópico
R12	-	Taxa de tensão para escoamento anisotrópico
R13	-	Taxa de tensão para escoamento anisotrópico
R23	-	Taxa de tensão para escoamento anisotrópico
F	-	Constantes de Hill's para escoamento anisotrópico
G	-	Constantes de Hill's para escoamento anisotrópico
H	-	Constantes de Hill's para escoamento anisotrópico
L	-	Constantes de Hill's para escoamento anisotrópico
M	-	Constantes de Hill's para escoamento anisotrópico
N	-	Constantes de Hill's para escoamento anisotrópico
σ	[MPa]	Tensão verdadeira
ε	-	Deformação verdadeira
K	[MPa]	Constante de resistência da lei de Hollomon
n	-	Coefficiente de encruamento da lei de Hollomon
F_x	[N]	Força no eixo X
F_y	[N]	Força no eixo Y
F_z	[N]	Força no eixo Z
F_{xy}	[N]	Força resultante XY
FR	[N]	Força resultante
F_{z_pico}	[N]	Força máxima no eixo Z
FR_pico	[N]	Forças resultante máxima
E	[MPa]	Módulo de elasticidade
ν	-	Coefficiente de Poisson

μ	[MPa]	Módulo de rigidez
δ	[g/cm ³]	Densidade
LR	[MPa]	Tensão de resistência
LE	[MPa]	Tensão de escoamento
Al	[%]	Alongamento total
t_f	[mm]	Espessura final da chapa ou corpo de prova
t_0	[mm]	Espessura inicial da chapa ou corpo de prova
σ_{es1}^2	[MPa]	Tensão de escoamento do material na direção 1
σ_{es2}^2	[MPa]	Tensão de escoamento do material na direção 2
σ_{es3}^2	[MPa]	Tensão de escoamento do material na direção 3
σ_{es23}^2	[MPa]	Tensão de escoamento do material na direção 23
σ_{es31}^2	[MPa]	Tensão de escoamento do material na direção 31
σ_{es12}^2	[MPa]	Tensão de escoamento do material na direção 12
σ_{11}	[MPa]	Tensão no material na direção 11
σ_{22}	[MPa]	Tensão no material na direção 22
σ_{33}	[MPa]	Tensão no material na direção 33
σ_{23}	[MPa]	Tensão no material na direção 23
σ_{31}	[MPa]	Tensão no material na direção 31
σ_{12}	[MPa]	Tensão no material na direção 12
σ_0	[MPa]	Tensão de escoamento do material
σ_1	[MPa]	Tensão principal 1
σ_2	[MPa]	Tensão principal 2
σ_3	[MPa]	Tensão principal 3
W_p	[MPa]	Energia hidrostática
W_v	[MPa]	Energia volumétrica
W_f	[MPa]	Energia desviatória
d_t	[mm]	Diâmetro da ferramenta
t	[mm]	Espessura da chapa
Δz	[mm]	Passo vertical ou incremento em z
l_0	[mm]	Comprimento inicial do CP
l_f	[mm]	Comprimento final do CP
w_f	[mm]	Largura final do CP
w_0	[mm]	Largura inicial do CP

- ϵ_w - Deformação verdadeira ao longo da largura do CP
- ϵ_h - Deformação verdadeira ao longo da espessura do CP

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	24
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	24
1.2 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA	26
1.3 JUSTIFICATIVAS	28
1.4 HIPÓTESES	29
1.5 OBJETIVOS	30
1.6 ESCOPO DA PESQUISA	31
1.7 ESTRUTURA DO DOCUMENTO	32
2. ESTADO DA ARTE	34
2.1 INTRODUÇÃO	34
2.2 ESTAMPAGEM INCREMENTAL DE CHAPAS (ISF)	37
2.2.1 Conformação Incremental Assimétrica por Ponto Único (SPIF)	40
2.2.2 Conformação Incremental Assimétrica por Dois Pontos (TPIF)	42
2.2.3 Conformação Incremental Assimétrica por Dois Pontos com Suporte Estático	43
2.2.4 Conformação Incremental Assimétrica por Dois Pontos com Matriz Dedicada	43
2.2.5 Vantagens e Limitações do Processo de Estampagem Incremental Assimétrica	44
2.3 ESTAMPAGEM INCREMENTAL CONVENCIONAL DE CHAPAS (CISF)	46
2.4 CARACTERÍSTICAS DA DEFORMAÇÃO EM ESTAMPAGEM INCREMENTAL	48
2.5 ESFORÇOS EM ESTAMPAGEM INCREMENTAL ISF	51
2.6 RESUMO	54
3. ENSAIO PRELIMINAR	56
3.1 INTRODUÇÃO	56
3.2 DISPOSITIVO ISF PILOTO E MÁQUINA-FERRAMENTA	56
3.3 PUNÇÃO E ESTRATÉGIA DE DEFORMAÇÃO	59
3.4 FATORES PRINCIPAIS	62
3.5 PILOTO DE FORÇAS	64
3.6 RESUMO	65
4 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	67

4.1	INTRODUÇÃO	67
4.2	MATERIAL E CARACTERÍSTICAS DO CORPO DE PROVA	67
4.2.1	Caracterização Metalográfica	68
4.2.2	Ensaio de Tração Uniaxial	70
4.2.3	Dureza do Material de Base	72
4.2.4	Geometria do Corpo de Prova	75
4.3	PUNÇÕES SEMIESFÉRICOS	77
4.3.1	Sistema Porta-Ferramenta	80
4.3.2	Montagem e Calibração do Conjunto	82
4.4	MÁQUINA E ACESSÓRIOS	82
4.4.1	Centro de Usinagem CNC	83
4.4.2	Programação NC	84
4.4.3	Preparação e Calibração do Equipamento	86
4.5	DINAMÔMETRO	88
4.5.1	Amplificador de Sinal	90
4.5.2	Montagem e Calibração do Sistema	91
4.6	DISPOSITIVO ISF	93
4.6.1	Troca Rápida dos Corpos de Prova	96
4.6.2	Estratégia de Aquisição e Registro dos Dados	97
4.6.3	Percurso do Punção e Zeramento do Sistema	98
4.7	PARÂMETROS DE PROCESSO	99
4.8	MÉTODO ESTATÍSTICO	100
4.8.1	Arranjo Experimental e Tamanho da Amostra	102
4.8.2	Sequência e Repetibilidade dos Testes	104
4.9	ROTEIRO DOS ENSAIOS E DETERMINAÇÃO DAS FORÇAS	105
4.9.1	Tratamento Científico dos Valores de Força	109
4.9.2	Forças F_x , F_y , F_z e F_{z_pico}	112
4.9.3	Forças F_{xy} , $F_{z_médio}$ e F_R	113
4.9.4	Tabela Padrão de Resultados Obtidos	114
4.10	RESUMO	115
5	RESULTADOS OBTIDOS	116

5.1 INTRODUÇÃO	116
5.2 EM RELAÇÃO AO DIÂMETRO DO PUNÇÃO DT=5MM	119
5.3 EM RELAÇÃO AO DIÂMETRO DO PUNÇÃO DT=6MM	131
5.4 EM RELAÇÃO AO DIÂMETRO DO PUNÇÃO DT=8MM	139
5.5 EM RELAÇÃO AO ÂNGULO DE PAREDE A=40°	150
5.6 EM RELAÇÃO AO ÂNGULO DE PAREDE A=50°	153
5.7 EM RELAÇÃO AO ÂNGULO DE PAREDE A=60°	157
5.8 EM RELAÇÃO À ESPESSURA DE CHAPA T=0,43MM	159
5.9 EM RELAÇÃO À ESPESSURA DE CHAPA T=0,65MM	162
5.10 EM RELAÇÃO À ESPESSURA DE CHAPA T=0,80MM	165
5.11 EM RELAÇÃO AO INCREMENTO $\Delta Z=0,4$ MM	167
5.12 EM RELAÇÃO AO INCREMENTO $\Delta Z=0,6$ MM	170
5.13 EM RELAÇÃO AO INCREMENTO $\Delta Z=0,8$ MM	173
5.14 EM RELAÇÃO AO AVANÇO F=150MM/MIN	175
5.15 EM RELAÇÃO AO AVANÇO F=175MM/MIN	178
5.16 EM RELAÇÃO AO AVANÇO F=200MM/MIN	181
5.17 RESUMO	183
6 ANÁLISE DOS RESULTADOS	185
6.1 INTRODUÇÃO	185
6.2 INFLUÊNCIA DO AVANÇO F	189
6.3 INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DA CHAPA T E DO INCREMENTO ΔZ	190
6.4 INFLUÊNCIA DO DIÂMETRO DO PUNÇÃO DT E DO ÂNGULO DE PAREDE A	195
6.5 INFLUÊNCIA DA INTERAÇÃO ESPESSURA DA CHAPA T E INCREMENTO ΔZ	200
6.6 INFLUÊNCIA DA INTERAÇÃO DT * ΔZ , A * ΔZ , A * T E DT * T	201
6.7 MODELO DE REGRESSÃO	205
6.8 ANÁLISE RESIDUAL	206
6.9 INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL VERSUS SIMULAÇÃO NUMÉRICA	215
6.10 ENSAIO COMPLEMENTAR PARA PROFUNDIDADE MÁXIMA HMÁX	217
6.11 RESUMO	223
7 CONCLUSÃO	225

7.1	COMPORTAMENTO ESTATÍSTICO E LIMITES TECNOLÓGICOS DOS FATORES PRINCIPAIS	225
7.2	CARGA DE CONFORMAÇÃO	230
7.3	SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS	235
	REFERÊNCIAS	237
	APÊNDICE A – ANÁLISE ESTATÍSTICA DAS DUREZAS	242
	APÊNDICE B – TABELA PADRÃO EXPERIMENTO FATORIAL 25	243
	APÊNDICE C – METALOGRAFIA DOS CORPOS DE PROVA	249
	APÊNDICE D – DELINEAMENTO DO EXPERIMENTO 25 (DOE)	250
	APÊNDICE E – DELINEAMENTO DO EXPERIMENTO 22 (DOE) – $h_{m\acute{a}x}$	263
	APÊNDICE F – PROPRIEDADES DO MATERIAL ENSAIADO	267
	APÊNDICE G – QUADRO DE GESTÃO À VISTA DO EXPERIMENTO DOE	269

1 INTRODUÇÃO

O processo de *Estampagem Incremental de Chapas* por intermédio de um punção esférico rotativo ou não, com ponto único de contato sobre o metal, foi patenteado por Leszak em 1967, muito antes do processo ser tecnologicamente viável em termos financeiros. Hoje em dia, este método de conformação de peças é possível, tanto para a produção de pequenos lotes de produtos estampados para reposição, quanto na rápida fabricação de elementos especiais, isto é, na prototipagem rápida de estampos como próteses e/ou peças customizadas. Nos dois casos, destaca-se o baixo investimento inicial em máquina-ferramenta, sistema de fixação e ferramental.

Essa tendência já havia sido prevista também por Schmoeckel em 1991. Esses novos processos são especialmente atrativos por utilizarem centros de usinagem CNC, três ou mais eixos, como máquinas-ferramentas, ou seja, torna-se viável fabricar produtos estampados utilizando os equipamentos tradicionais de usinagem que estão amplamente disponíveis nas indústrias. Em se tratando de pequenos lotes consegue-se produzir peças de qualidade (DE LUCCA, 2015). Ademais, com razoável complexidade geométrica, em tempos curtos, sem a necessidade de projeto e a fabricação da matriz resultando, consequentemente, num custo por peça absolutamente competitivo (JESWIET *et al.*, 2005).

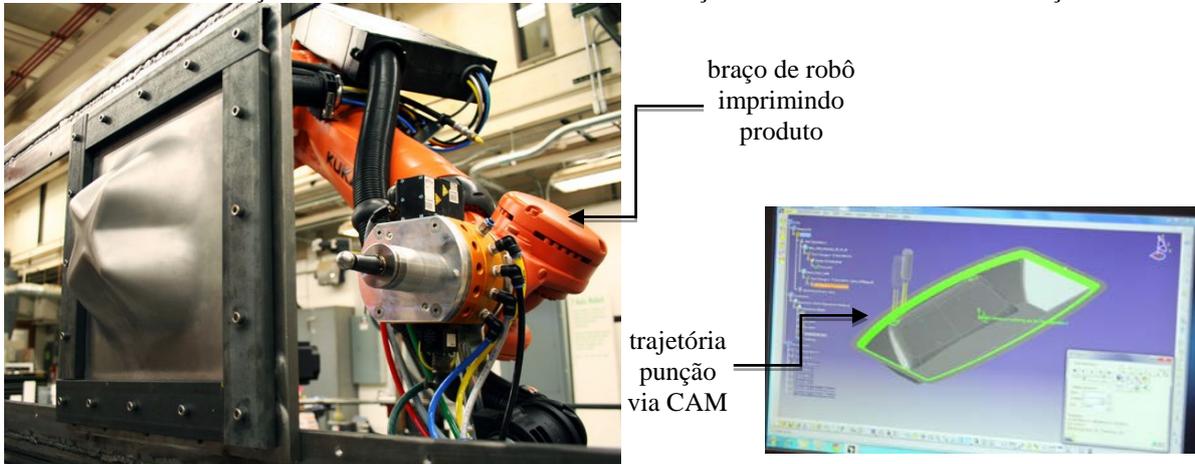
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Neste contexto, desponta uma nova tecnologia que está substituindo, em parte, a estampagem tradicional de chapas metálicas – a chamada estampagem progressiva ou estampagem incremental de chapas (ISF), do inglês *Incremental Sheet Forming*. O processo consiste na estampagem de peças de metal com relativa complexidade e precisão, a partir de arquivos concebidos em CAD e estratégias de percurso do punção, em três ou mais eixos, definidas por intermédio de um software CAM comercial (SCHAEFFER, 2004).

A trajetória da ferramenta é controlada por programa, utilizando a tecnologia CNC, permitindo, nesse sentido, que as chapas metálicas sejam estampadas através de pequenas deformações induzidas durante a trajetória da ferramenta (YANLE *et al.*, 2014), conforme ilustrado na FIGURA 1. Outra possibilidade é a utilização de braço de robô automatizado como sistema de movimentação da ferramenta de conformação – FC, ou seja, o produto é estampado de acordo com a trajetória percorrida pelo punção, contudo, esse é um conjunto

que tende a ser mais complexo para o adequado controle e, possivelmente, mais caro do que o realizado em CNC.

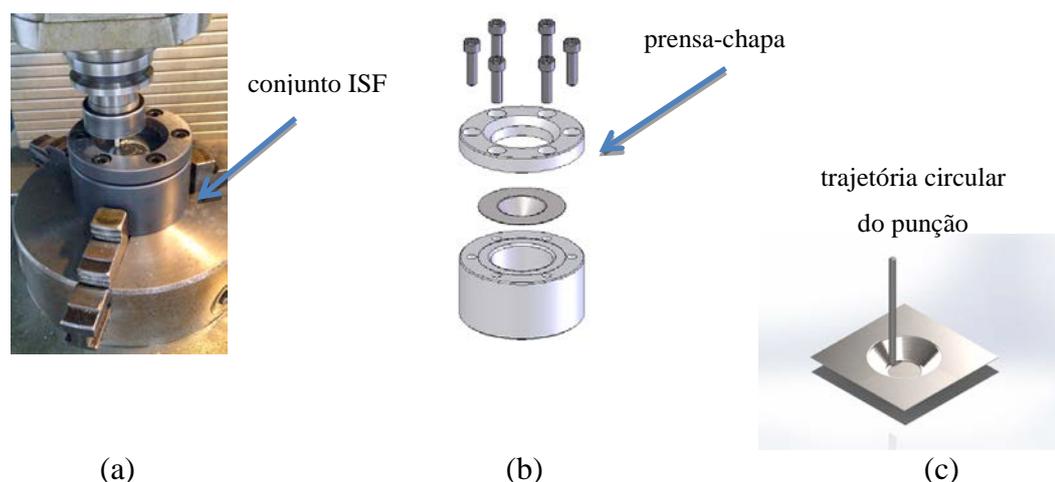
FIGURA 1 - APLICAÇÃO DE SOFTWARE CAM NA GERAÇÃO DO PERCURSO DO PUNÇÃO EM ISF.



A trajetória da ferramenta é controlada por programa, utilizando a tecnologia CNC, permitindo, nesse sentido, que as chapas metálicas sejam estampadas através de pequenas deformações induzidas durante a trajetória da ferramenta (YANLE *et al.*, 2014), conforme ilustrado na FIGURA 1.

A chapa é montada no dispositivo ISF e fixada ao conjunto por meio do elemento prensa-chapa com pressão de contato ajustada pelos parafusos prisioneiros em 12Nm, ou seja, podendo-se, assim, assegurar o torque exato ao sistema. Ademais, o dispositivo ISF está acoplado à mesa do centro de usinagem CNC e adequadamente zerado e alinhado aos eixos de movimentação da máquina. Na FIGURA 2(a), (b) e (c), tem-se a representação do conjunto ISF, do sistema de fixação prensa-chapa e, efetivamente, da peça utilizada nessa investigação (na forma tronco de cone), o qual está montada e em pleno uso no equipamento, FIGURA 2 (a).

FIGURA 2 - EXEMPLO DO PROCESSO DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL DE CHAPAS (ISF).



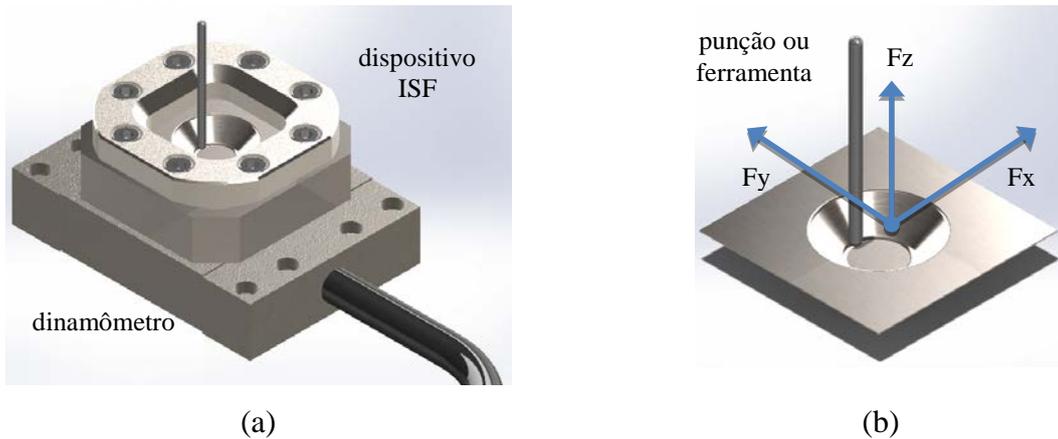
FONTE: O autor.

1.2 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

No intuito de se utilizar máquinas CNC's para a realização do processo de conformação incremental de chapas, uma das características críticas mais sensíveis à sua execução é o limite máximo de esforço mecânico que o eixo árvore do equipamento pode suportar. Isso porque os elementos construtivos da máquina-ferramenta impõem o máximo de esforço de deformação que a ferramenta acoplada ao respectivo conjunto mandril/eixo árvore poderá imprimir na chapa. Desse modo, torna-se preponderante o conhecimento das cargas máximas de conformação que serão atingidas durante o processo de obtenção de uma dada geometria para se evitar danos ao sistema de fixação da ferramenta. Esse limite pode ser obtido pela soma vetorial das forças axial F_z , e radiais F_x e F_y que o punção sofre durante o processo de estampagem incremental, ou seja, a força resultante reativa sobre o porta-ferramenta não pode jamais exceder os limites tecnológicos da máquina. Na FIGURA 3 (a) e FIGURA 3 (b) verificam-se as forças de conformação nas três direções e a respectiva força resultante FR. A equação 1 demonstra a soma vetorial dos respectivos esforços em x, y e z.

Adicionalmente, além dos cuidados com a máquina-ferramenta CNC, devem também ser observados os limites de resistência do sistema de fixação da peça e, em especial, da própria ferramenta, de maneira que os esforços presentes no processo não ocasionem o cisalhamento da ferramenta ou, até mesmo, sua deformação, sob pena de gerar-se erros de forma ao produto em fabricação. Outrossim, naturalmente, os esforços não podem exceder os limites de estampabilidade da própria chapa, isto é, não podem proporcionar tensões superiores àquelas suportadas pela combinação material/espessura do metal.

FIGURA 3 - CARACTERIZAÇÃO DAS FORÇAS DE CONFORMAÇÃO NAS DIREÇÕES X, Y E Z E DA FR.



FONTE: O autor.

$$\mathbf{FR} = \mathbf{F}_x + \mathbf{F}_y + \mathbf{F}_z \quad (\text{Equação 1})$$

Nesse âmbito, Duflou *et al.* (2007), reporta que as variáveis de processo e de projeto que contribuem significativamente com a força resultante FR de conformação são:

- a) O diâmetro do punção, d_t [mm]
- b) O incremento por passe no eixo Z, Δz [mm]
- c) O ângulo de inclinação da parede a ser deformada, α [°]
- d) A velocidade de avanço do punção, f [mm/min]
- e) As propriedades do material e a espessura da chapa, t [mm]

Outros parâmetros importantes:

- a) A rotação do punção, n [rpm]
- b) O lubrificante na interface punção e chapa, μ

Logo, o problema principal investigado teórico e experimentalmente nesse projeto é a proposição de uma função matemática composta pelas variáveis independentes significativas com suas respectivas correções e erros envolvidos na determinação experimental dessa equação. Nesse sentido, foi aplicada uma metodologia estatística que proporciona a compreensão do fenômeno do processo de estampagem incremental de chapas com ponto único em termos de esforços mecânicos.

Desse modo, matematicamente, a partir dos parâmetros de processo, do material e da espessura da chapa, torna-se possível estimar a carga máxima de conformação do ponto mais crítico do produto em termos de estampabilidade. Essa informação tecnológica é fundamental para que seja analisada a viabilidade da realização do processo num centro de usinagem CNC sem colocar em risco sua integridade funcional, ou seja, assegura-se que não serão ultrapassados os limites máximos de resistência da máquina-ferramenta ou de qualquer outro subsistema em uso, como o próprio punção ou o dispositivo de fixação da peça. Sendo assim, pode-se avaliar com significativo grau de confiança a possibilidade da fabricação de um produto por estampagem incremental contínua associada à combinação geometria da peça/material e processo/máquina. Evidentemente, a obtenção dos esforços máximos de conformação mecânica permite também analisar o comportamento da chapa ao longo da conformação e, dessa maneira, detectar eventuais falhas ou defeitos que possam surgir no decorrer do estiramento da mesma. A chapa sofre, basicamente, uma combinação de embutimento na direção vertical e estiramento ao longo do percurso da parede que está sendo deformada, e a região crítica é o raio final formado próximo da base mais profunda da geometria projetada, FIGURA 4 (MALHOTRA, 2012).

FIGURA 4 - ÁREA CIRCUNFERENCIAL SUJEITA A TRINCAS.



FONTE: Malhotra (2012).

1.3 JUSTIFICATIVAS

A presente investigação é justificada pelo fato de proporcionar a concepção de um modelo matemático experimental, preliminar, para a determinação dos esforços de conformação mecânica no processo de estampagem incremental assimétrica com ponto único. Nesse sentido, a partir das variáveis independentes: diâmetro da ferramenta “ d_i ”; incremento

em z , " Δz "; ângulo de inclinação da parede da peça " α "; velocidade de avanço do punção " f "; e da espessura da chapa " t " será possível estimar o comportamento da variável dependente força resultante FR ou da maior força presente no processo como Fz_{pico} . Ademais, será possível prever se, para determinadas combinações de geometria da peça, material e espessura de chapa, uma determinada máquina CNC está apta à realização da fabricação do produto, sem riscos ao equipamento e, concomitantemente, se os limites de conformação do material não serão ultrapassados gerando eventuais danos à própria peça. Nesse momento, cabe destacar também que a principal diferenciação da tecnologia ISF (*Incremental Sheet Forming*) é justamente o fato de se utilizar centros de usinagem CNC's encontrados amplamente nas fábricas em geral, sem a necessidade de grandes investimentos em matrizes para a produção das respectivas peças. Naturalmente, essa aplicação ISF está circunscrita, por ora, na obtenção de pequenos lotes e na fabricação de peças customizadas.

1.4 HIPÓTESES

Entre os métodos estatísticos possíveis para o tratamento experimental da carga de conformação, foi avaliada a possibilidade de se utilizar Taguchi. Entretanto, o principal objetivo desse método é otimizar a produção de produtos ou serviços com qualidade a baixo custo de transformação (MONTGOMERY, 2012). Todavia, nessa fase da pesquisa que se está investigando o comportamento do fenômeno do esforço de conformação optou-se, por conseguinte, por aplicar o método DOE fatorial completo.

O planejamento de experimentos DOE (*Design of Experiments*) é uma técnica utilizada para se planejar experimentos empiricamente, ou seja, para definir quais dados, em que quantidade e em que condições devem ser coletados durante um determinado experimento, almejando, basicamente, satisfazer dois grandes objetivos: a maior precisão estatística possível na resposta e o menor custo na realização do ensaio. Logo, o projeto segue um rigoroso planejamento experimental do tipo fatorial completo 2^k , visto que esse modelo de planejamento permite a avaliação, em separado, dos efeitos individuais, ditos fatores puros, e dos efeitos de interação dos fatores combinados.

Nessa pesquisa, tem-se cinco fatores importantes, variando em dois níveis, baixo e alto. Assim, o delineamento experimental DOE proposto é 2^5 , totalizando 32 tratamentos, com possibilidade de repetição. O nível de confiança assumido foi de 99%, $\alpha=0,01$. Com a aplicação dessa metodologia foi necessário também avaliar o comportamento de cada fator, a fim de verificar se a equação matemática que representa cada fator apresenta função linear ou

quadrática, isto é, a incorporação de pontos centrais ao arranjo científico para a devida avaliação.

Desse modo, foram testadas as várias hipóteses para avaliar a significância de cada fator e, em seguida, a descrição estatística do modelo de regressão do fenômeno com seu erro experimental associado, ou seja, a respectiva análise da variável resposta de força máxima chamada Fz_pico presente no processo. Na sequência, foi avaliado o comportamento dos resíduos determinados com o intuito de convergir para uma distribuição normal dos mesmos e com média zero. Condições estas necessárias para o aceite final do modelo matemático sob investigação teórico-experimental.

1.5 OBJETIVOS

O principal objetivo deste trabalho é, fundamentalmente, a concepção de um **modelo de regressão matemático** com nível de confiança estabelecido em 99%, a partir do planejamento experimental DOE fatorial 2^5 , o qual possa, sobretudo, ser aplicado para uma primeira determinação dos **esforços máximos de conformação** no respectivo processo de estampagem incremental de chapas (ISF) assimétrico, por ponto único, em centros de usinagem CNC, sob investigação nesta pesquisa. Dessa maneira, tornar-se-á possível então dimensionar o sistema de fixação da chapa necessário para suportar os respectivos esforços calculados, e avaliar também se o punção e o conseguinte fuso do centro de usinagem CNC suportam a carga máxima estimada. Por fim, será permitido avaliar se, nesses patamares de deformação a integridade superficial e geométrica da peça estará assegurada, ou seja, sem riscos iminentes de danos ao produto em fabricação. Evidentemente, essa função estatística deve ser testada em termos de normalidade do sinal ruído e, em especial, servir para uma proposta simples de fluxograma para tomada de decisão acerca das influências que cada variável significativa tem na performance do processo ISF.

Além da obtenção dessa equação principal, o trabalho busca gerar informações que possam contribuir no desenvolvimento tecnológico do processo ISF por intermédio de outras seis análises secundárias:

- a) Identificar o local e o instante da maior força de conformação presente no decorrer do processo de estampagem progressiva;
- b) Desenvolver uma metodologia científica assertiva para a adequada varredura estatística do comportamento de cada fator em estudo;

- c) Avaliar a influência das principais variáveis de processo e de projeto na maior força de conformação observada;
- d) Comparar, preliminarmente, os dados obtidos experimentalmente com aqueles obtidos por intermédio da simulação numérica via Abaqus®;
- e) Estimar, inicialmente, os limites de deformação para as chapas utilizadas nessa pesquisa em termos de profundidade máxima de estampagem.

1.6. ESCOPO DA PESQUISA

A pesquisa foi conduzida através do centro de usinagem CNC ROMI DISCOVERY Modelo 4022, FIGURA 5 (a), disponível no laboratório de usinagem do departamento de engenharia mecânica da UFPR, bem como foi utilizado um dinamômetro Kistler tipo 9129AA para aquisição das cargas nas três direções X, Y e Z, FIGURA 5 (b).

O material utilizado foi o aço comercial de alto grau de estampabilidade ASTM A653 CS-A G90, nas espessuras 0,43mm, 0,65mm e 0,80mm, fornecido pela Companhia Siderúrgica Nacional CSN. Essas espessuras devem ser pequenas para garantir que as cargas geradas no processo não ultrapassem o próprio limite de aquisição de carga do dinamômetro e, ademais, não coloquem em risco a integridade do sistema de fixação da ferramenta.

Não foi aplicada rotação ao eixo árvore a fim de reduzir o efeito decorrente do atrito entre as partes deslizantes punção/chapa e, dessa forma, aparentemente, favorecer o processo. Por outro lado, o aporte térmico gerado na interface peça/ferramenta pode, ocasionalmente, facilitar a deformação da chapa. Essa relação de compromisso não foi analisada nessa investigação.

O material da ferramenta é metal-duro K40 e, adicionalmente, revestida com AlTiCN, carbonitreto de titânio alumínio, no intuito de reduzir o coeficiente de atrito do topo esférico e, assim, a possível adesão entre o par de materiais peça/punção. O processo foi a seco e sem a adição de qualquer outro tipo de lubrificante, somente o punção foi revestido, e os respectivos corpos de prova com cobertura de zinco. Os dois níveis de cada fator, baixo e alto, estão descritos no capítulo 3 na ocasião do ensaio preliminar do planejamento experimental, sendo que foram realizadas também três repetições para cada tratamento, ou seja, foram necessários 96 ensaios para percorrer o experimento fatorial 2^5 com três repetições. Entretanto, com o objetivo de avaliar, simultaneamente, a linearidade de cada variável independente, foram adicionados ao planejamento experimental mais 10 ensaios, exatamente nos níveis dos pontos

centrais. Dessa forma, o total de ensaios realizado nesse projeto foi de: 32 ensaios com 3 repetições para os níveis -1 e +1; 10 ensaios para o nível 0; resultando em 106 testes.

FIGURA 5 - CENTRO DE USINAGEM E DINAMÔMETRO KISTLER TIPO 9129AA PARA AQUISIÇÃO DE CARGAS.



(a) Centro de usinagem



(b) Dinamômetro

FONTE: O autor.

1.7 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

A seguir, no capítulo 2, tem-se a revisão bibliográfica do tema que fundamenta o conceito da tecnologia de estampagem incremental de chapas (ISF) e o estado da arte em termos de desenvolvimento tecnológico desse processo de fabricação.

A partir do capítulo 3, por sua vez, apresentam-se os resultados dos ensaios preliminares realizados com o intuito de ajustar os parâmetros de processo da pesquisa, validar a utilização do centro de usinagem CNC como equipamento principal e, em especial, aprimorar o projeto do dispositivo ISF utilizado para a correta fixação do corpo de prova à mesa da máquina e, consecutivamente, viabilizar a aquisição dos esforços.

Adiante, no capítulo 4, está descrito detalhadamente o planejamento experimental DOE fatorial completo 2^5 arranjado para a tese, isto é, todos os materiais, equipamentos e, em destaque, o método utilizado para o tratamento dos dados gerados no decorrer dos testes.

Já no capítulo 5, tem-se a apresentação da metodologia inovadora aplicada para a explanação dos resultados obtidos por meio de uma intensa varredura do comportamento de cada fator principal.

Seguindo, no tópico 6 consta a análise do delineamento experimental por intermédio do ambiente Minitab, ou seja, toda a modelagem estatística, análise residual e, por fim, a função matemática que representa o fenômeno sob investigação.

Quase no final da tese, no capítulo 7, apresentam-se as considerações finais e a conclusão da pesquisa, buscando consolidar as respostas necessárias para os respectivos objetivos propostos no item 1.5 e, adicionalmente, as sugestões para a continuação dos estudos e, nesse sentido, o perene desenvolvimento tecnológico da área de fabricação.

Finalmente, no capítulo 8, constam as referências bibliográficas dos documentos, artigos, monografias, dissertações e teses utilizados como base para o adequado estudo do tema, bem como são apresentados, na sequência, os apêndices que trazem informações complementares da corrida experimental em curso.

2 ESTADO DA ARTE

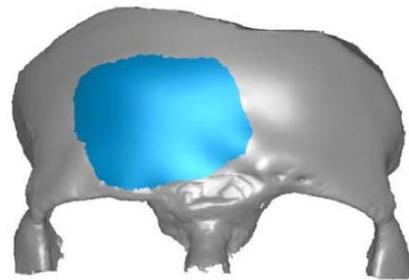
2.1 INTRODUÇÃO

O processo de conformação mecânica chamado estampagem incremental de chapas ou, do inglês *Incremental Sheet Forming (ISF)*, é uma tecnologia com quase 50 anos, patenteada por Leszak em 1967 e que, desde então, vem revolucionando o setor metal-mecânico, em especial, a área de fabricação de pequenos lotes estampados e também de produtos customizados, a exemplo do segmento de próteses humanas, FIGURA 6 (a), (b) e (c) (BERTOL, 2012). Esta tecnologia permite que protótipos ou pequenos lotes sejam fabricados em aço, titânio, alumínio, ou outros metais conformáveis e, inclusive, em polímeros, diretamente a partir de um modelo CAD 3D que serve como gabarito e referência para a trajetória do punção. Essa trajetória é controlada numericamente por uma máquina-ferramenta CNC, via programação CAM, o que significa que o produto final é obtido sem o uso de ferramentas convencionais de conformação mecânica dos metais, como matrizes e subsistemas, as quais elevariam, sobremaneira, o tempo e o custo de obtenção desse produto (SENA, 2009).

FIGURA 6 - EXEMPLO DE APLICAÇÃO DA TECNOLOGIA ISF NA OBTENÇÃO DE PRÓTESES



(a) Base do modelo a ser obtido.



(b) Modelo a ser obtido (CAD/CAM)

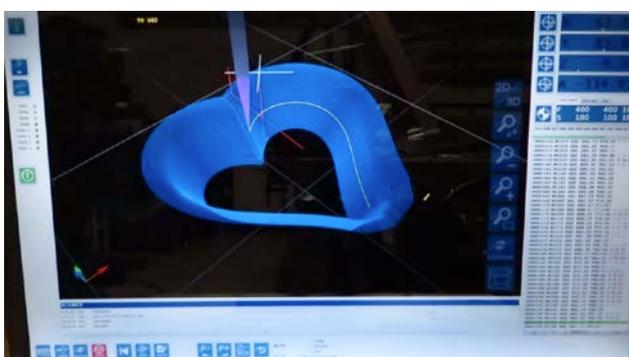


(c) Prótese produzida por ISF (CNC).

FONTE: Bertol (2012).

No processo ISF de manufatura computadorizada, FIGURA 7 (a), a trajetória gerada é executada pela ferramenta de conformação – FC, chamada punção, a qual se desloca nas três direções do plano cartesiano X, Y e Z, de forma incremental, FIGURA 7 (b), de acordo com Tschachtsch (2006). Ademais, segundo Marabuto *et al.* (2011), a estampagem incremental de chapas é um processo de conformação de baixo custo, com crescente aplicação na prototipagem rápida, biomecânica e produção de pequenos lotes de peças em chapas, sendo que, atualmente, a compreensão e o desenvolvimento do processo se concentra, especialmente, nas áreas numérica e experimental.

FIGURA 7 - GERAÇÃO DA TRAJETÓRIA CAD E A ESTAMPAGEM INCREMENTAL EM CENTROS CNC.



(a) Geração trajetória CAM.



(b) ISF com percurso incremental X, Y e Z

FONTE: Disponível em < <https://www.youtube.com/watch?v=eh0ddqxs0KI> > Acessado em 18 de julho de 2016.

Assim sendo, o processo de estampagem incremental é controlado numericamente pela máquina CNC, tendo como referência o sistema de coordenadas cartesianas, orientando o movimento vertical, longitudinal e transversal da ferramenta de conformação – FC. O sistema CAM gera a trajetória a ser executada pelo punção. A ferramenta desloca-se na horizontal no plano XY e efetua deslocamentos verticais de forma incremental em Z sendo que, destes movimentos sincronizados, depende o acabamento da superfície da peça final (Azaouzi, 2012). No que diz respeito às pesquisas experimentais, a maioria dos equipamentos usados para a estampagem incremental de chapas resultam da adaptação de máquinas CNC's que executam o processo com larga gama de aplicações em termos de materiais e geometrias (JESWIET *et al.*, 2005). O uso de robôs cinemáticos também tem sido observado em pesquisas, e apresenta grandes vantagens em termos de área de trabalho e flexibilidade. Apesar disso, a adição de erros devido às articulações dos robôs agrava o processo de estampagem incremental de chapas no que tange à exatidão da geometria final do componente

(MEIER *et al.*, 2005). Todavia, esses erros, e até mesmo o efeito *springback*, podem ser compensados por intermédio de correções incorporadas na própria programação que conduzirá a trajetória do punção, Paniti (2014). Na FIGURA 8, tem-se o exemplo de aplicação de braço robótico ABB na estampagem ISF com dois punções sincronizados, (MEIER *et al.*, 2012).

FIGURA 8 - BRAÇOS ROBÓTICOS ABB ATUANDO, SINCRONIZADAMENTE, NO PROCESSO TPIF.



FONTE: Paniti (2014).

Considerando as faixas de mercado abrangentes por esta tecnologia ISF – lotes pequenos de peças automotivas para reposição; próteses fabricadas em materiais biocompatíveis; e estampagens de geometrias customizadas a partir de chapas de pequenas espessuras, percebe-se, outrossim, que a estampagem incremental é um processo de fabricação que tem grande potencial de exploração, além de forte apelo em termos econômicos, ambientais e, porque não, sociais (CAO, 2015). Pesquisas nacionais e internacionais relacionadas à estampagem incremental de chapas têm se concentrado em ligas de alumínio e titânio, de modo que existe grande carência de informações de parâmetros do processo para materiais ferrosos, como aços inoxidáveis e aços de boa estampabilidade (CAVALER, 2010), bem como para aços avançados, como os do tipo AHSS, os quais têm crescente aplicabilidade na indústria automotiva e na linha branca, (EMMENS; SEBASTIANI; BOOGAARD, 2010).

2.2 ESTAMPAGEM INCREMENTAL DE CHAPAS (ISF)

A estampagem incremental de chapas (ISF) é um processo de fabricação inovador e, razoavelmente acessível, cuja definição, segundo Kopac (2005), consiste num processo de estampagem de chapas de metal, no qual um *blank* é conformado por um punção de tamanho pequeno, comandado por controle numérico, seja num centro de usinagem CNC, por intermédio de um braço de robô ou, até mesmo, por meio de sistemas especiais.

Dessa maneira, a estampagem pode ser realizada com matriz bastante simplificada ou até mesmo sem matriz. O processo parece ser muito interessante para pequenos volumes de produção e também para a prototipagem rápida de componentes de chapas customizados. O processo de estampagem incremental é, na verdade, um termo que descreve uma série de métodos de estampagem de chapas de metal. Em comum, estes métodos têm uma capacidade de formar geometrias com matrizes simples ou até com a ausência delas, ambos a baixo custo. O processo ISF não requer ferramentas caras para produzir peças complexas de chapas de metal, e o equipamento de estampagem pode ser adequado para uma grande quantidade de produtos sem grandes trocas ou investimentos complementares (AMBROGIO *et al.*, 2012).

Diversos grupos de investigação têm feito pesquisas na área de estampagem incremental. A maior parte destas pesquisas é relatada para máquinas comerciais de ISF, ou seja, estampagem utilizando centros de usinagem CNC ou similares (LAMMINEN, 2005). As variações de ISF podem ser divididas dentro de duas categorias principais: estampagem de superfícies convexas ou superfícies côncavas, FIGURA 9 (FRITZEN, 2012). Kitazawa *et al.* (2001) e Kitazawa *et al.* (1997) têm focado estampagem incremental num torno, enquanto Jeswiet *et al.* (2005), Kim *et al.* (2001) e Leach *et al.* (2001) têm estudado a aplicação da tecnologia de estampagem incremental CNC para formas não simétricas – assimétricas, formadas sobre superfícies côncavas num centro de usinagem CNC. Neste último, o *blank* ou matéria-prima permanece estacionária, e a estampagem ocorre usando o controle CNC da ferramenta (BAMBACH *et al.*, 2004).

FIGURA 9 - ESTAMPAGENS CONVEXA E CÔNCAVA.

(a) ISF convexa, positiva.

(a) ISF cônica, negativa.

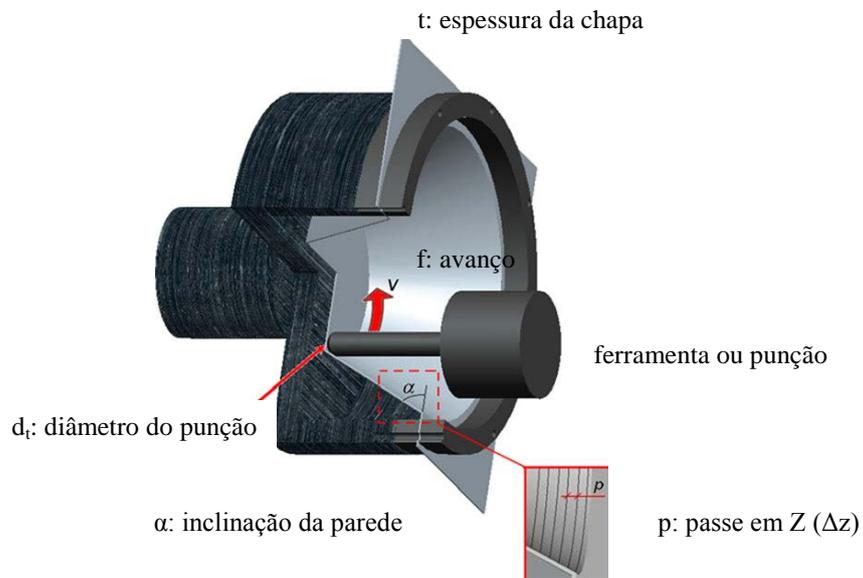
FONTE: Fritzen (2012).

A estampagem de superfície cônica foi a primeira variação da ISF, conhecida como estampagem CNC sem matriz (*Dieless NC Process Forming*), sendo introduzida no Japão por Matsubara em 1994, como um método para prototipagem e fabricação de produtos a partir de chapas de metal para pequenas séries. O método foi originalmente desenvolvido para as necessidades da indústria automobilística, entretanto, atualmente, também é usado em outras finalidades industriais (LAMMINEN, 2005).

De acordo com Sena (2009), pode-se dizer que a estampagem incremental é um novo método de deformação plástica que permite criar um produto com determinada configuração/geometria, sem a utilização de punção e/ou matriz com características complexas. Na última década, esta tecnologia tem se desenvolvido intensamente como uma nova linha de pesquisa relacionada ao processo de conformação de chapas. A designação atribuída para este método de deformação por sucessivos incrementos abrange, ademais, várias técnicas que possuem aspectos em comum. Embora a técnica de deformação incremental possa ser interpretada de diferentes maneiras, segundo Ambrogio (2011), este processo distingue-se, obrigatoriamente, pelas seguintes características:

- a) Ferramenta genérica de pequena dimensão;
- b) Ausência ou utilização de matrizes dedicadas;
- c) Contato contínuo entre a ferramenta e a chapa;
- d) Movimento tridimensional 3D e controle do punção (FIGURA 10).

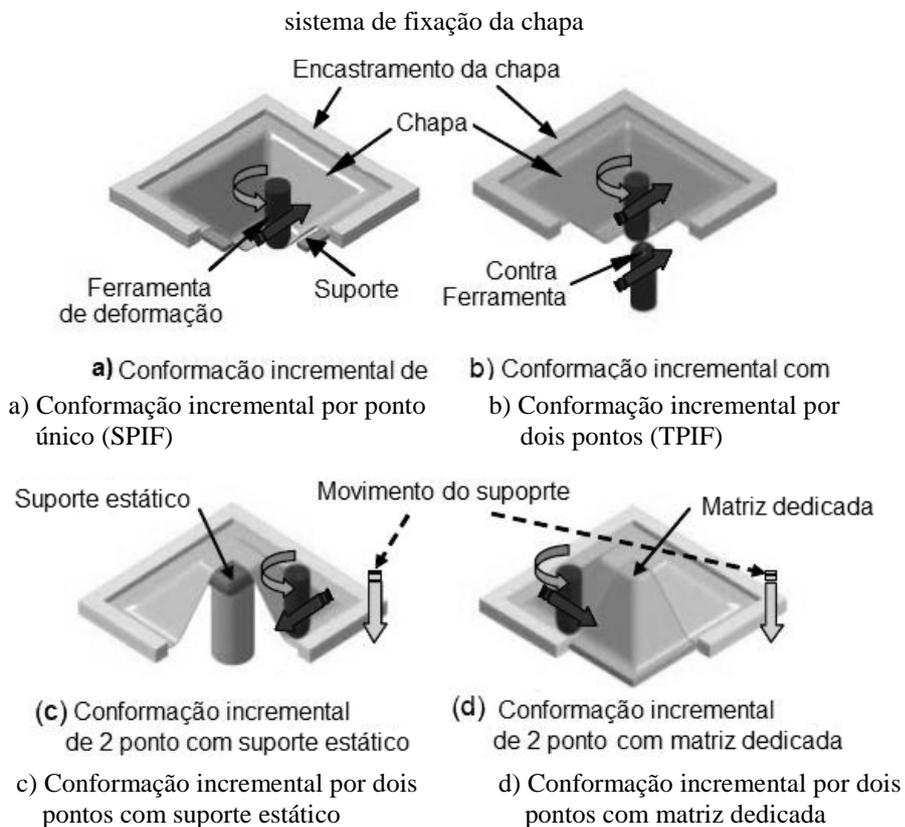
FIGURA 10 - CONFORMAÇÃO INCREMENTAL, CARACTERÍSTICAS IMPORTANTES.



FONTE: Ambrogio (2011).

A seguir, na FIGURA 11, apresenta-se as diferentes configurações ou técnicas referentes ao processo de conformação incremental assimétrica – ISF (JESWIET *et al.*, 2005).

FIGURA 11 - VARIANTES DO PROCESSO DE CONFORMAÇÃO INCREMENTAL ASSIMÉTRICA.



Fonte: Jeswiet *et al.* (2005).

As configurações 11 (a) e 11 (b) possuem um sistema de fixação para a chapa fixo, enquanto nas configurações 11 (c) e 11 (d) o sistema movimenta-se na vertical, sincronizadamente com a ferramenta de deformação da chapa. A última configuração – FIGURA 11 (d) – apresenta uma matriz dedicada com forma pré-definida, ou seja, mostra um gabarito com determinada geometria que permite imprimir a forma final da peça sobre a matriz modelo, deslocando, simultaneamente, o sistema de suporte da chapa no intuito de viabilizar o adequado ajustamento de posição chapa/ponta do punção.

Estas últimas duas configurações – 11 (c) e 11 (d) –, normalmente, são implementadas em máquinas exclusivamente dedicadas a esta técnica de deformação incremental, enquanto no caso das configurações 11 (a) e 11 (b), normalmente são associadas às máquinas-ferramentas CNC's, tipicamente um centro de usinagem tradicional, por exemplo. Deste modo, pode-se dizer que a estampagem incremental assimétrica apresenta dois principais tipos de variantes, a deformação incremental por único ponto (SPIF, do inglês “*Single Point Incremental Forming*”); e a deformação incremental por dois pontos (TPIF, do inglês “*Two Point Incremental Forming*”) (RAUCH, 2009).

2.2.1 Conformação Incremental Assimétrica por Ponto Único (SPIF)

A investigação da deformação assimétrica incremental por ponto único foi impulsionada por Jeswiet *et al.* (2005), entre outros, demonstrando que este método pode ser implementado numa máquina-ferramenta CNC de três eixos, incluindo a aplicação dos softwares CAD/CAM, para planejar a trajetória da ferramenta de conformação, o punção, possibilitando a fabricação de peças complexas. Desse modo, neste tipo de estampagem incremental, a superfície da chapa não está suportada, ou seja, é deformada em forma “livre” pela ferramenta que desliza sobre a superfície da chapa, como ilustrado anteriormente pela FIGURA 11 (a).

A deformação plástica é gerada pela ferramenta em rotação ou não, acoplada ao eixo vertical principal do sistema CNC, por meio de incrementos negativos executados gradualmente no eixo Z da máquina. O sistema de fixação nas extremidades da chapa evita que esta se desloque enquanto a conformação ocorre. Durante a deformação da chapa, a ferramenta de conformação está em contato com a superfície interna do componente que está sendo fabricado, gerando, incrementalmente, uma concavidade. Além da flexibilidade de aplicação e utilização de ferramentas de baixo custo, existem ainda outras vantagens

relacionadas à aplicação do processo de estampagem incremental assimétrica por ponto único, a saber (CERRO *et al.*, 2006):

- ✓ Este processo SPIF dispensa qualquer tipo de matriz, no entanto, precisa de uma zona de suporte que possibilite criar o ângulo de deformação na zona fixada;
- ✓ As tensões originadas na zona de mudança de ângulo são facilmente corrigidas e controladas pela pressão do punção;
- ✓ Normalmente, é dispendioso fazer protótipos em chapa, sendo que, com esta técnica, o custo de fabricar esses mesmos protótipos é substancialmente menor;
- ✓ A estampabilidade dos materiais é, aparentemente, acrescida;
- ✓ Uma máquina convencional de CNC pode ser utilizada para aplicação deste processo;
- ✓ O tamanho do componente só é limitado pelo tamanho da mesa da máquina CNC;
- ✓ A qualidade do acabamento superficial dos componentes pode ser controlada;
- ✓ O funcionamento e modo de operação são, relativamente, pouco ruidosos;
- ✓ Facilidade de alterações no leiaute da unidade fabril devido o equipamento ser de menor dimensão e peso, facilitando o transporte para grandes distâncias.

No entanto, Jeswiet *et al.* (2005) também relatam que existem algumas limitações neste processo, tais como:

- ✓ O tempo de formação do componente aumenta com a profundidade da geometria da peça a estampar;
- ✓ A utilização deste processo está limitada à produção de pequenos lotes de peças;
- ✓ Ocorre recuperação elástica, tornando necessário o desenvolvimento de algoritmos de correção da geometria projetada;
- ✓ A formação de paredes verticais não pode ser efetuada em um único passo.

Logo, percebem-se claramente vantagens tecnológicas que compensam o contínuo desenvolvimento do processo e, em especial, oportunidades para a redução dos custos de fabricação, gerando, até mesmo, ganhos em termos de versatilidade para o catálogo de produtos da empresa.

2.2.2 Conformação Incremental Assimétrica por Dois Pontos (TPIF)

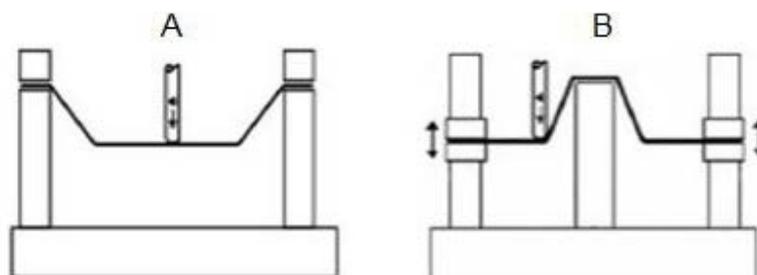
A conformação incremental assimétrica por dois pontos – TPIF, como ilustrado anteriormente na FIGURA 11 (b), é uma variante da estampagem incremental assimétrica por ponto único – SPIF. A sua designação se deve ao contato simultâneo de dois pontos com a chapa em deformação, ou seja, o contato da ferramenta principal de conformação e o contato da ferramenta auxiliar de conformação situada na zona inferior da chapa.

As características que as diferenciam são: a ausência do elemento de apoio inferior para criar o ângulo de deformação na chapa, no caso da SPIF e; no caso da TPIF, o uso de uma segunda ferramenta – apoio auxiliar – de conformação, localizada em posição oposta à ferramenta principal de conformação.

A principal utilização deste tipo de estampagem incremental com contra-ferramenta é na produção de peças de alta complexidade e precisão dimensional. A ferramenta auxiliar necessita de uma trajetória de conformação distinta da trajetória da ferramenta principal, com movimento controlado e independente, tendo como requisito o uso de uma máquina específica ou um mecanismo auxiliar a ser implementado na máquina CNC (SILVA, 2008).

Ademais, as variantes do processo de estampagem incremental assimétrica por dois pontos também podem ser denominadas por negativas ou positivas. Park e Kim (2003) realizaram um estudo de modo a classificar o processo segundo as características de conformação durante a formação da peça, sendo atribuída a designação negativa para a peça que apresenta uma superfície côncava na face em contato com a ferramenta de conformação, ilustrada na FIGURA 12 (a); e a designação positiva à formação de uma superfície convexa que está em contato com a ferramenta de conformação, representada pela FIGURA 12 (b).

FIGURA 12 - CONFORMAÇÃO NEGATIVA (A) E CONFORMAÇÃO POSITIVA (B).

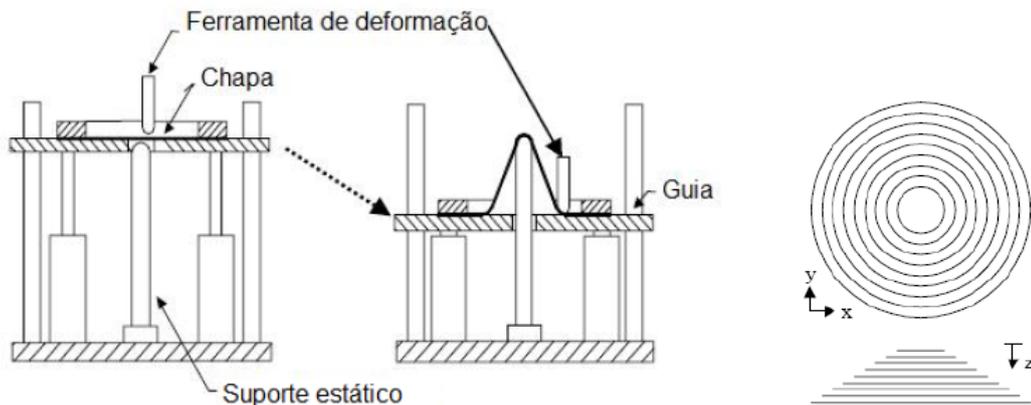


FONTE: Park e Kim (2003).

2.2.3 Conformação Incremental Assimétrica por Dois Pontos com Suporte Estático

Neste processo, a chapa movimenta-se verticalmente e em conjunto à zona de fixação – deslocamento sincronizado –, por meio de um sistema de colunas guias, sobre um suporte estático que auxilia na conformação, enquanto a ferramenta esférica forma o perfil geométrico na chapa. O suporte estático cria uma força de apoio na chapa, atuando como um punção fictício, também responsável pela determinação da forma geométrica final da peça (SENA, 2009).

FIGURA 13 - ESQUEMA REPRESENTATIVO DA CONFORMAÇÃO INCREMENTAL COM SUPORTE ESTÁTICO.



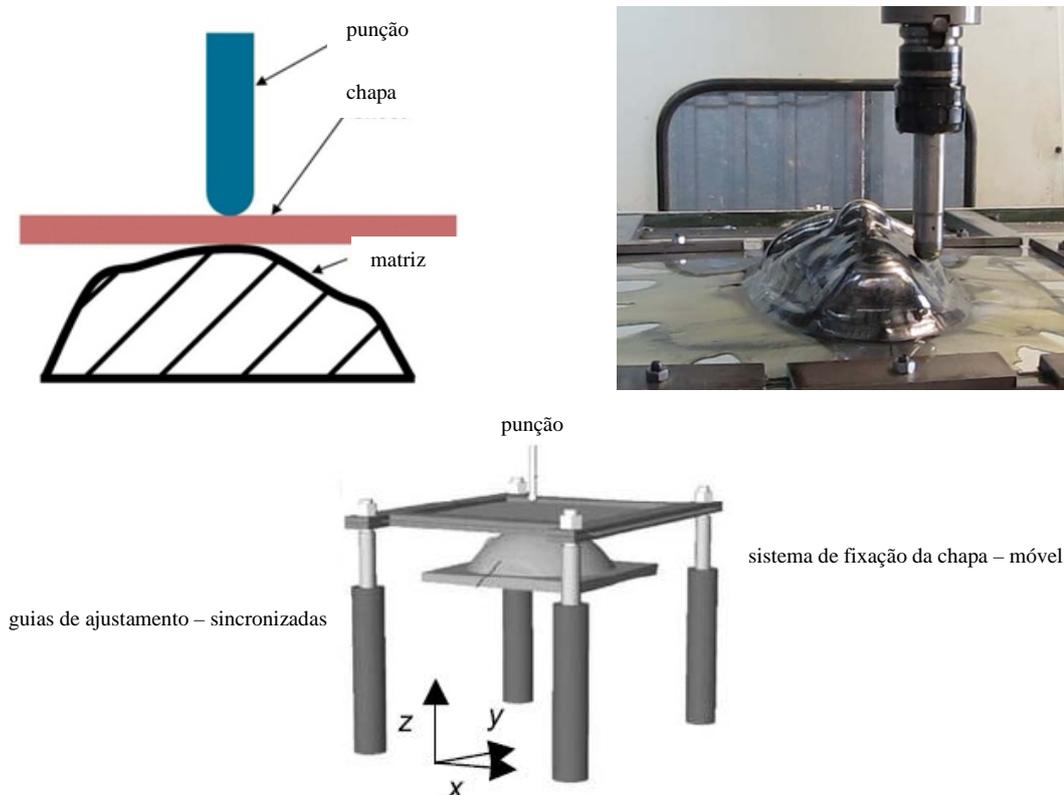
FONTE: Jeswiet *et al.* (2005).

A figura 13 mostra a representação do equipamento de estampagem incremental assimétrica por dois pontos com suporte estático e, ao lado, a trajetória da ferramenta de conformação – FC para formar um tronco de cone invertido na respectiva chapa.

2.2.4 Conformação Incremental Assimétrica por Dois Pontos com Matriz Dedicada

Esta técnica utiliza os mesmos componentes que o processo descrito anteriormente, com exceção do tipo de suporte usado no contato com a superfície inferior da chapa. Em lugar do suporte local estático, utiliza-se uma matriz dedicada, normalmente fabricada em materiais maciços de baixo custo, como, por exemplo, em resina ou material polimérico. Porém, pode-se dizer que esta técnica de estampagem incremental não é verdadeiramente livre de matriz em comparação com a técnica de estampagem incremental por ponto único, FIGURA 14, (SENA, 2009).

FIGURA 14 - ESQUEMA DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL POR DOIS PONTOS COM MATRIZ DEDICADA.



FONTE: O autor.

De um modo geral, as vantagens associadas a estes dois tipos variantes da estampagem incremental por dois pontos, com suporte estacionário e com matriz dedicada, são: a inexistência de erros de forma em regiões planas; e o rigor geométrico da peça final produzida, superior à técnica de estampagem por ponto único “livre”. No entanto, a complexidade e o custo deste tipo de estampagem incremental com suporte/matriz são maiores em relação ao processo de conformação por ponto único – SPIF. A razão se deve ao aumento de componentes necessários para efetuar esta técnica de conformação, refletindo-se no custo de produção do dispositivo e do próprio processo.

2.2.5 Vantagens e Limitações do Processo de Estampagem Incremental Assimétrica

Segundo Meier *et al.* (2011), a utilização do processo de fabricação de produtos em chapas por estampagem incremental é favorável e recomendável nas seguintes aplicações:

- ✓ Na fabricação de peças para reposição ou produção de pequenos lotes de componentes: isto quando as peças já não são produzidas pelos fabricantes de origem ou, então, a fabricação pelo processo convencional de estampagem apresenta um custo superior;
- ✓ Na prototipagem rápida, nas etapas de desenvolvimento e concepção de novos produtos: quando não é suficiente a simulação computacional e a fabricação de um protótipo auxilia a análise funcional e de forma do produto;
- ✓ Em aplicações da medicina: em que este método permite a fabricação de próteses com as características exclusivas de cada paciente;
- ✓ Na obtenção de produtos customizados: que podem agregar valor ao formato padrão do mesmo, como eletrodomésticos caracterizados, por exemplo.

Outrossim, a estampagem incremental de ponto único tem aplicação na produção de lotes pequenos e, em especial, onde a forma dos produtos tende a variar em um curto espaço de tempo, podendo ter tanto geometrias simples como também complexas. Desse modo, segundo Kumar & Kumar (2015), as principais vantagens desse processo são:

- ✓ Produção de peças diretamente do arquivo CAD;
- ✓ Inexistência de matriz;
- ✓ Alterações do projeto podem ser fácil e rapidamente realizadas;
- ✓ Aumento de conformabilidade do material;
- ✓ Pode ser realizada numa máquina CNC convencional;
- ✓ Devido à natureza incremental do processo, as forças são pequenas;
- ✓ Dimensão das peças são limitadas apenas pela máquina-ferramenta;
- ✓ Boa qualidade de acabamento da superfície pode ser alcançada.

Por outro lado, as desvantagens verificadas no processo são cruciais para grandes lotes de produção. Nesse sentido, Kumar & Kumar (2015), citam também:

- ✓ Maior tempo de conformação em comparação ao processo de estampagem convencional;
- ✓ Limitada a pequenos lotes de produção;
- ✓ A formação de ângulos retos deve ser alcançada por meio de estratégias em várias fases de conformação;

- ✓ O retorno elástico ocorre, embora possa ser minimizado usando algoritmos de correção;
- ✓ Menor precisão da geometria, particularmente em raios convexos, arestas e áreas de dobra.

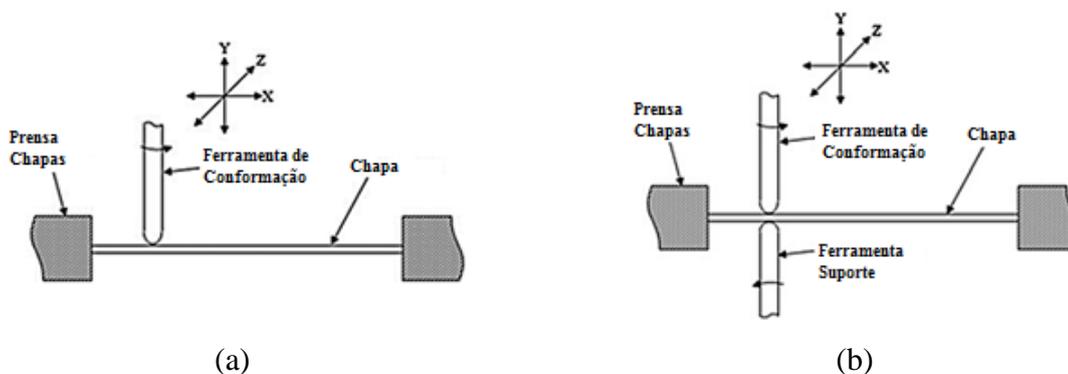
2.3 ESTAMPAGEM INCREMENTAL CONVENCIONAL DE CHAPAS (CISF)

Embora exista uma gama de tipos e variedades de processos de estampagem incremental de chapas, os processos SPIF, TPIF e outras variações deles são amplamente relatadas por outros autores da área como Jeswiet; Micari; Hirt; Bramley; Duflou; Allwood (2005), Lihui; Kangning; Cai; Yang; Guo; Bu (2014) e Cavaler (2010). No entanto, pesquisas recentes apresentadas por Kumar & Kumar (2015), começaram a classificar os processos de estampagem incremental de chapas em dois grupos principais, sendo eles a estampagem incremental convencional – CISF e estampagem incremental híbrida – HISF.

Nos processos CISF, geralmente uma chapa de metal é deformada pela progressiva deformação plástica localizada, usando uma ou duas ferramentas de ponta semiesférica simples, onde o caminho da FC é controlado por uma máquina CNC ou braço robótico. A FC se move sobre a superfície da folha e resulta na forma final do produto. Neste tipo de processo, não existe nenhuma outra ferramenta ou pressão externa aplicada para conformar a chapa na forma desejada.

O processo de estampagem incremental convencional agrupa os processos de estampagem incremental por ponto único – SPIF e de estampagem incremental por dois pontos – TPIF, ilustrados nas FIGURAS 15 (a) e 15 (b), (KUMAR & KUMAR, 2015).

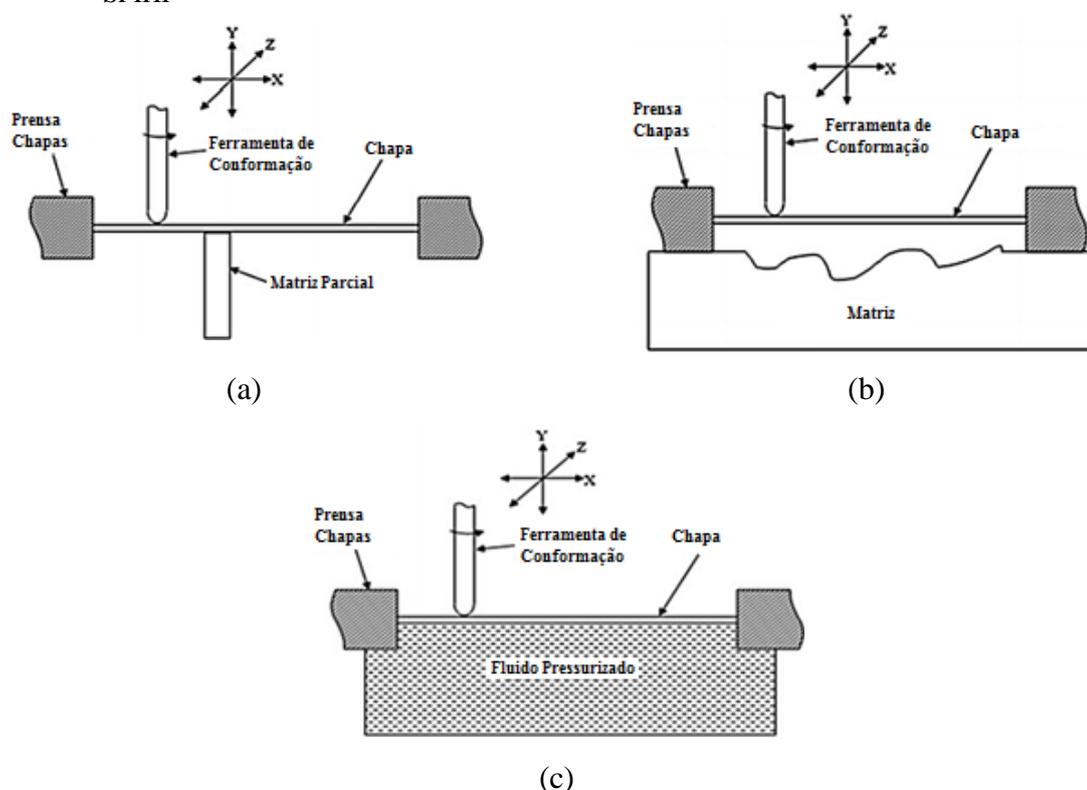
FIGURA 15 - ESTAMPAGEM CISF: (A) – SPIF E (B) – TPIF.



FONTE: Kumar & Kumar (2015).

Os processos HISF são formas modificadas dos processos de estampagem incremental convencional. Nestes processos, a FC se move sobre a superfície da chapa, enquanto o outro lado da superfície da chapa é suportado por um sistema hidráulico com fluido pressurizado ou uma matriz parcial ou completa, com o intuito de se obter a forma e tamanho desejados no processo de estampagem incremental híbrida. Os processos híbridos podem ser classificados em estampagem; TPIFPD, com matriz parcial; TPIFFD, com matriz completa; e SPIHF, com pressão de fluido, ilustrados na FIGURA 16.

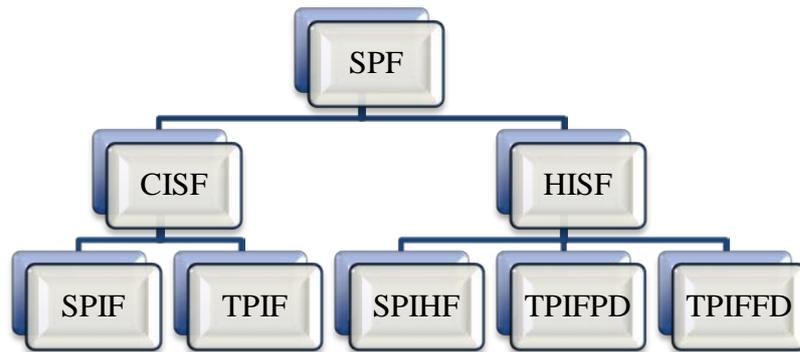
FIGURA 16 - (A) MATRIZ PARCIAL TPIFPD, (B) MATRIZ COMPLETA TPIFFD E (C) PRESSURIZADA SPIHF



FONTE: Kumar & Kumar (2015).

Portanto, segundo Kumar & Kumar (2015), a classificação do processo de estampagem incremental de chapas pode ser melhor estruturada conforme o quadro apresentado na FIGURA 17.

FIGURA 17 - CLASSIFICAÇÃO DO PROCESSO DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL DE CHAPAS.

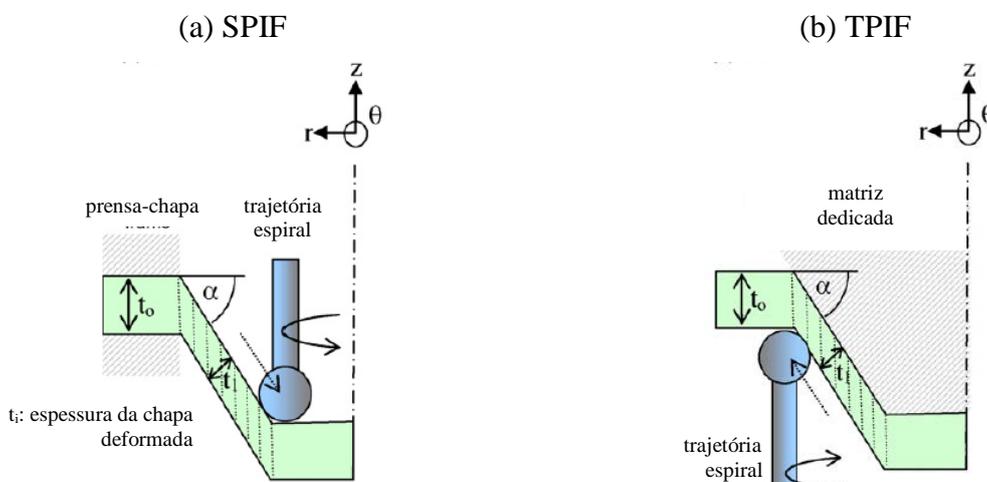


FONTE: Kumar & Kumar (2015).

2.4 CARACTERÍSTICAS DA DEFORMAÇÃO EM ESTAMPAGEM INCREMENTAL

Nos métodos clássicos de estampagem incremental de chapas, a zona de deformação é muito pequena e estritamente limitada à área de contato entre a ferramenta e a peça de trabalho, FIGURAS 18 (a) e (b). Contudo, durante a deformação, a constância de volume proporciona uma relação direta entre a espessura da parede e o ângulo de parede, a qual tem sido comumente referenciada como “Lei do Seno”, EQUAÇÃO 2, e que leva a um afinamento da chapa, ou até mesmo à falha no caso de uso de grandes ângulos em um único passe. A Lei do Seno, válida para a estampagem incremental de ponto único, foi apresentada por Jackson & Allwood (2009).

FIGURA 18 - MECANISMO DE DEFORMAÇÃO ASSOCIADO AO PROCESSO ISF.



FONTE: Jackson & Allwood (2009).

Lei do Seno:

$$t_f = t_0 * \text{sen}(90^\circ - \alpha) \quad (\text{Equação 2})$$

Onde,

t_f - Espessura final da chapa [mm];

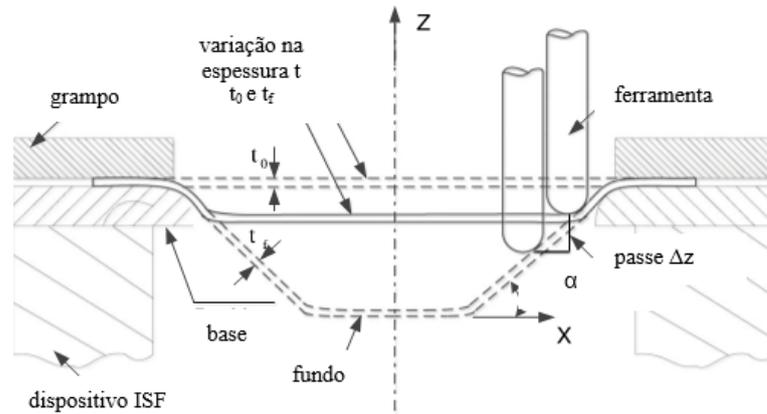
t_0 - Espessura inicial da chapa [mm];

α - Ângulo de parede [°];

Com relação a rotação da ferramenta, segundo Jackson & Allwood (2009), no processo SPIF a ferramenta pode se movimentar com ou sem rotação própria. No caso da ferramenta sem rotação própria, a movimentação é imposta pelo deslocamento na mesa, fazendo com que a ferramenta se movimente de forma passiva enquanto deforma a chapa, FIGURA 19. No caso da ferramenta com rotação própria, a ferramenta de estampagem gira sobre a superfície da chapa com rotação constante imposta pela máquina. Segundo Cavaler (2010), esta variável controla o aquecimento da chapa durante a deformação, assim como influencia, também, na escolha da lubrificação.

A lubrificação é importante na estampagem incremental de ponto único, a fim de reduzir o atrito na interface da ferramenta/chapa, além de melhorar a qualidade da superfície da peça estampada (BERTOL, 2012). Em pesquisas realizadas com chapas de Al 3103-O, 0,85milímetros de espessura, em peça tipo copo cônico com ângulo de parede $\alpha=60^\circ$, com FC rotativa, Duflou; Tunçkol; Szekeres; Vanherck (2007), analisaram várias condições com diferentes lubrificantes além de efetuarem um teste sem lubrificante. Nesse contexto, verificou-se que, no caso do uso de lubrificantes, a força pico observada ao longo do processo de estampagem incremental antegiu valores próximos de 350N. No entanto, nos experimentos conduzidos sem lubrificação, observaram-se altos tempos de processamento e, sobretudo, pequenas fraturas na chapa devido ao aquecimento pontual gerado pela fricção da ferramenta sobre a peça, danificando, definitivamente, o produto.

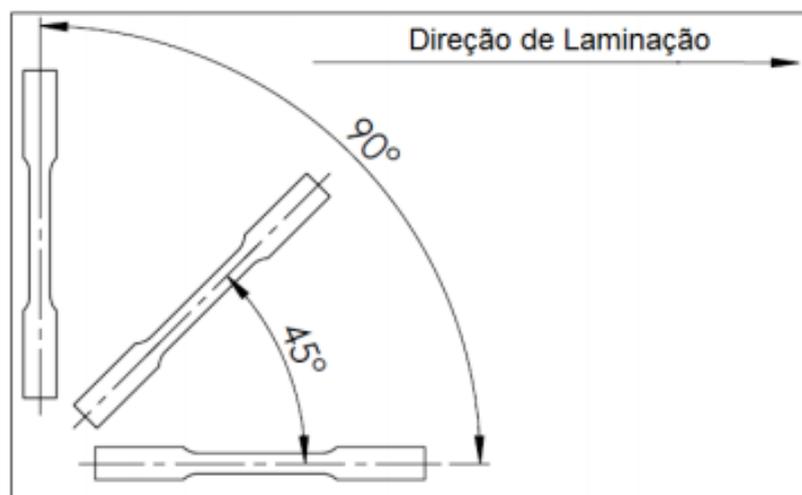
FIGURA 19 - CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO ISF POR PONTO ÚNICO, FC SEM ROTAÇÃO.



FONTE: Yanle *et al.* (2014).

Por fim, os coeficientes de encruamento e anisotropia podem modificar a conformabilidade das chapas metálicas. Ao analisar ambas as propriedades, verifica-se que o encruamento tem uma forte correlação com o estiramento puro, limite de escoamento, limite de resistência e alongamento, enquanto que a anisotropia está fortemente relacionada aos esforços gerados no embutimento, Nakazima *et al.* (1968). Sendo que anisotropia média (r_m) de uma chapa é obtida através da média ponderada dos valores de r nas três direções: 0° (paralela), 45° (diagonal) e 90° (perpendicular) à direção de laminação. A figura 20 abaixo apresenta as 3 direções onde são retiradas as amostras para medição da anisotropia média.

FIGURA 20 - REPRESENTAÇÃO DAS DIREÇÕES DOS CORPOS DE PROVA NA CHAPA LAMINADA.



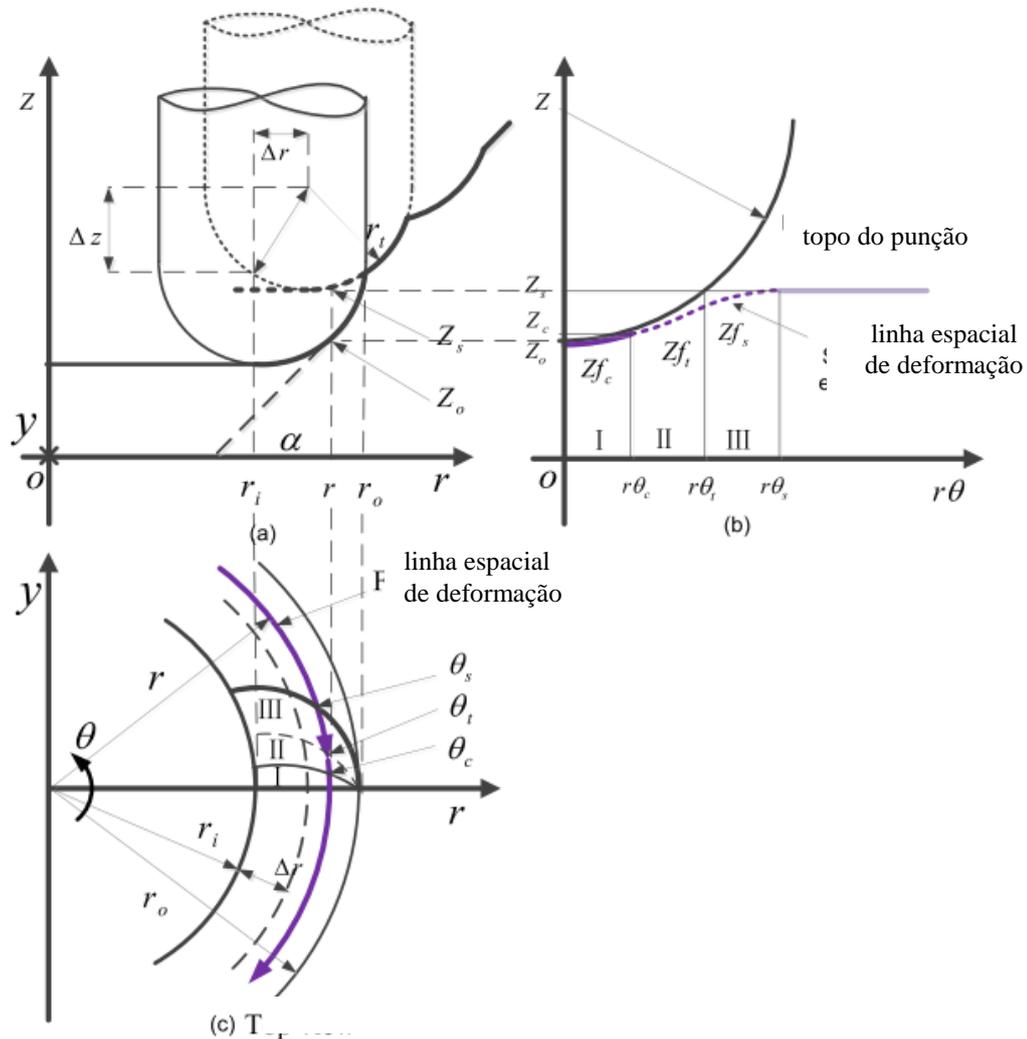
FONTE: O autor.

2.5 ESFORÇOS EM ESTAMPAGEM INCREMENTAL ISF

Embora tenham sido desenvolvidas algumas pesquisas empíricas para otimizar a precisão do produto final obtido por estampagem incremental – ISF, constata-se, outrossim, a necessidade de uma compreensão maior da mecânica de deformação local da chapa e, em especial, uma investigação mais aprofundada sobre a força de conformação da peça. Logo, a FIGURA 21 traz, segundo Yanle *et al.* (2014), as três zonas de deformação observadas na região preferencial de conformação mecânica, sendo: Zona I, região de contato punção/chapa; Zona II, região sem contato; e a Zona III, região sem contato – sendo que a divisão entre as zonas II e III é definida pela altura da superfície da chapa que está sendo deformada, FIGURA 21 (b). Ressalta-se, nesse contexto, que o incremento em z , Δz , tende a ser uma variável importante para o controle da magnitude das cargas de deformação.

Prosseguindo, segundo Yanle *et al.* (2014), a intensidade dos esforços de deformação observados na estampagem incremental de chapas – ISF – é maior na fase inicial do processo e, em seguida, tende a se tornar estável durante o restante do trajeto da ferramenta. Esse fenômeno pode ser decorrente do desenvolvimento inicial da própria deformação plástica – endurecimento do material – que acarreta, inicialmente, um incremento na força de conformação verificada. Isto ocorre de acordo com a característica da curva de tensão-deformação do respectivo material em uso. Ademais, pesquisas sugerem que o embutimento é o mecanismo mais importante nesta fase inicial de conformação. Além disso, com a acumulação da área de contato entre o topo do punção e a chapa, a força necessária para deformar a chapa também tende a crescer.

FIGURA 21 - ZONAS DE DEFORMAÇÃO EM ISF E LINHA DE FLUXO DO MATERIAL.



FONTE: Yanle *et al.* (2014).

Dessa maneira, esses dois fenômenos, conjuntamente, indicam um aumento inicial dos esforços na estampagem – ISF. Porém, após a estabilização dos esforços, ou seja, ao longo do percurso que está sob deformação contínua, constata-se, nesse momento, a combinação dos mecanismos de embutimento e estiramento do material. Assim sendo, as cargas tendem a permanecer estáveis. Por outro lado, na medida que a chapa for afinando, nota-se, por conseguinte, uma redução dos esforços necessários para a estampagem da chapa.

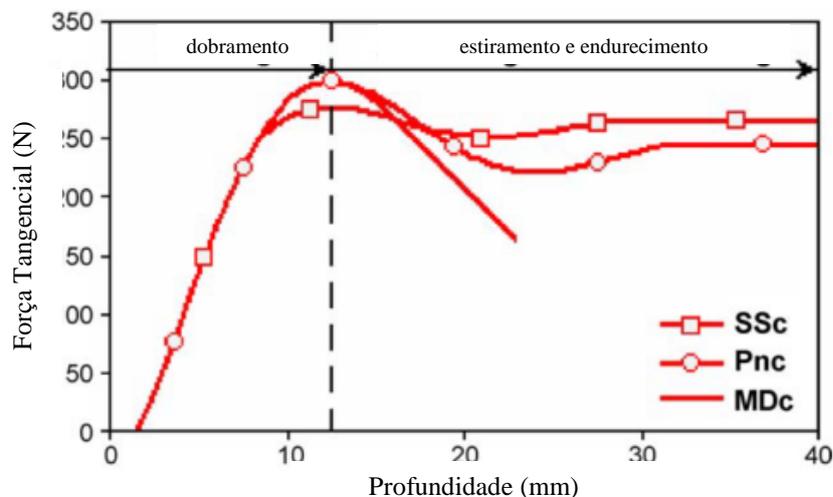
Isto posto, verifica-se um balanceamento de fenômenos ao longo do processo de estampagem incremental do material, sendo: por um lado, o incremento dos esforços por meio do endurecimento contínuo do mesmo e; por outro lado, a redução das cargas necessárias à deformação – na medida que a chapa for afinando. Sendo assim, a combinação desses efeitos – endurecimento e afinamento – é que determinará os esforços presentes no processo em cada

trajeto do punção. Naturalmente, a geometria da ferramenta, a espessura da chapa, as propriedades do material e a complexidade do produto influenciam sobremaneira nos esforços.

Adicionalmente, Ambrogio *et al.* (2006), indicam que existem 3 tendências distintas para o comportamento dos esforços na estampagem incremental após o pico de início do processo. Na FIGURA 22 verificam-se as áreas distintas.

- ✓ SSc: Comportamento estável, onde o afinamento da chapa compensa o endurecimento do material;
- ✓ Pnc: Comportamento polinomial, onde o afinamento da chapa é maior no início do processo e, na sequência, é compensado pelo endurecimento do material;
- ✓ MDc: Comportamento linear, onde o afinamento é preponderante no decorrer de todo o processo e, provavelmente, ocorrerá a falha prematura da peça.

FIGURA 22 - TENDÊNCIAS NAS FORÇAS DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL DE CHAPAS – ISF.

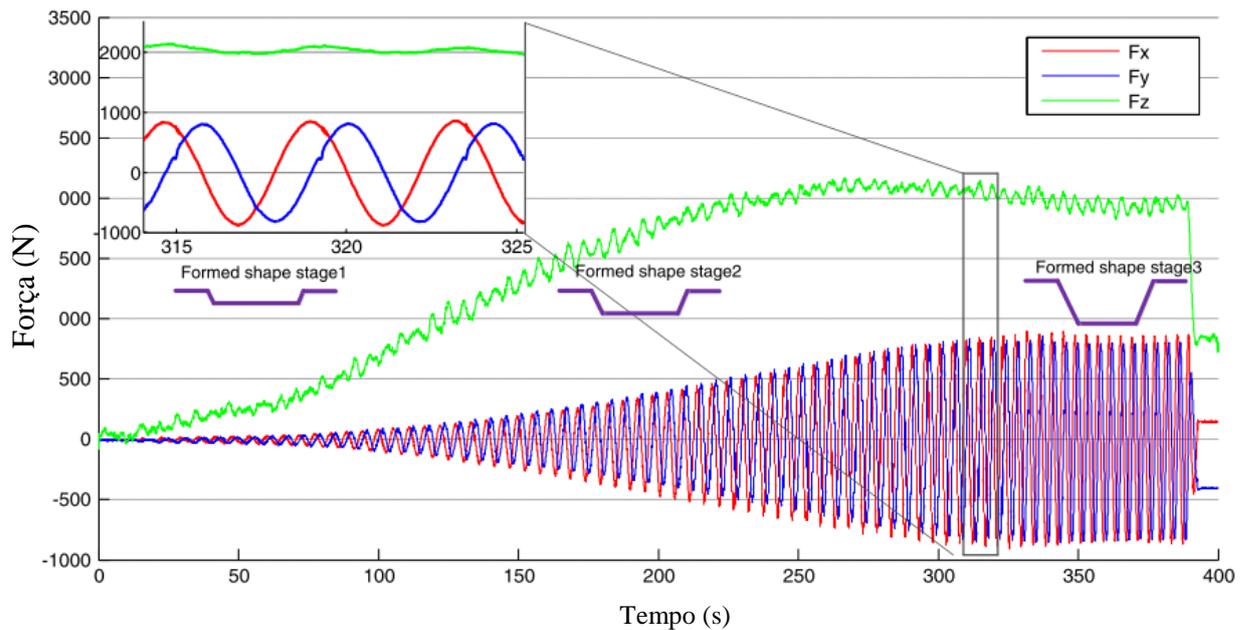


FONTE: Ambrogio *et al.* (2006).

Ainda na pesquisa conduzida por Yanle *et al.* (2014), encontra-se o monitoramento das forças F_x , F_y e F_z – induzidas pelo punção e sofridas pela peça – ao longo do processo de deformação do material. Essas forças são obtidas por meio de dinamômetro piezoelétrico e, são essenciais para as análises tecnológicas que, por conseguinte, impulsionam o desenvolvimento do processo ISF. Desse modo, a FIGURA 23 apresenta a variação das forças de conformação ao longo do trajeto de conformação. A peça formada é um troco de cone e, na respectiva figura, percebem-se 3 estágios de estampagem incremental com seus respectivos valores de profundidade da peça. Os parâmetros de processo aplicados foram: $dt=15\text{mm}$,

$\alpha=60^\circ$, $t=1,6\text{mm}$, $\Delta z=0,5\text{mm}$ e $f=4000\text{mm/min}$. O material utilizado foi alumínio Al 7075-O, com a aplicação de lubrificante por *spray*, sendo do tipo Shell Tellus Oil 68. Destaca-se, no canto superior esquerdo, o recorte do comportamento das forças F_x , F_y e F_z , onde, nitidamente as forças F_x e F_y apresentam trajetória senoidal e a força vertical F_z um comportamento razoavelmente estável, com leve tendência decrescente.

FIGURA 23 - ESFORÇOS NA ESTAMPAGEM INCREMENTAL NAS DIREÇÕES F_x , F_y E F_z .



FONTE: Yanle *et al.* (2014).

Por fim, na literatura encontram-se também outras formas de medição das forças sofridas pelo punção, como por exemplo o método utilizado por De Lucca, 2015, que realiza a análise das forças de estampagem incremental com o auxílio de extensometria. Portanto, independente do método, o mais relevante é a adequada aquisição e compilação dos dados gerados, no intuito de se otimizar os parâmetros de processo para: alcançar a maior profundidade de conformação; não gerar danos ao produto; não comprometer a integridade da máquina; e não sobrecarregar o punção – FC.

2.6 RESUMO

Nesse capítulo, pôde-se verificar os conceitos básicos da tecnologia de conformação incremental de chapas ISF e os seus respectivos tipos – SPIF e TPIF – com suas principais aplicações. Apresentou-se também a teoria inicial de conformação mecânica dos metais e, em especial, as informações tecnológicas em termos de forças na estampagem incremental de

chapas. Ratificou-se, sobretudo, a importância do desenvolvimento de pesquisas buscando alavancar a obtenção de peças estampadas a menor custo em centros de usinagem CNC. Isto é, a clara tendência de disseminação do uso de estampagem progressiva para a obtenção de produtos inovadores e customizados, estimulando a competitividade da empresa e a atratividade comercial.

3 ENSAIO PRELIMINAR

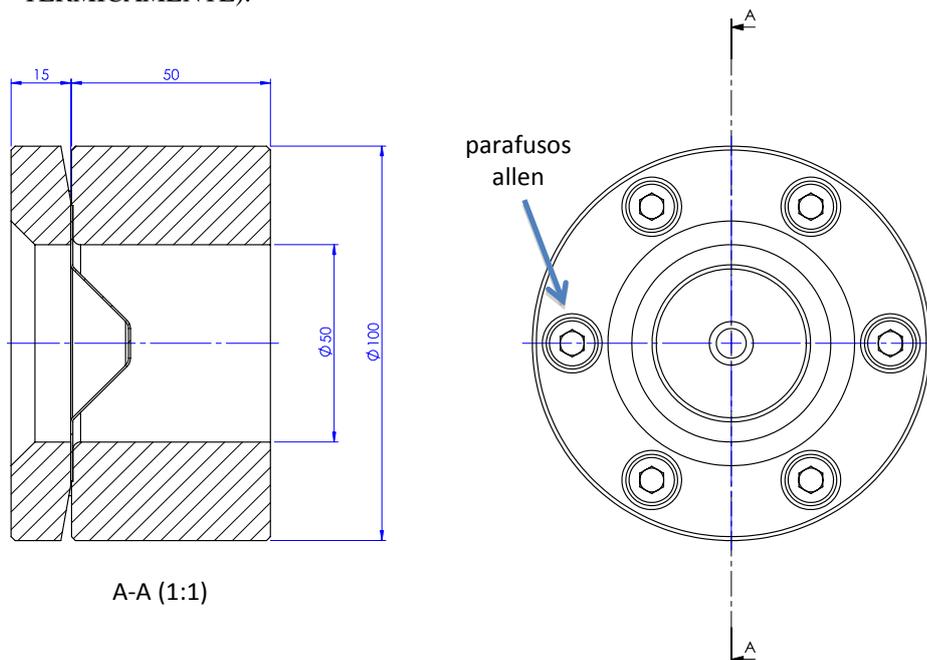
3.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo está descrito o ensaio piloto realizado no Laboratório de Fabricação do Departamento de Engenharia Mecânica – DEMEC, da Universidade Federal do Paraná, UFPR, tendo como principal objetivo dimensionar e validar a ordem de grandeza dos fatores principais do experimento fatorial proposto e, sobretudo, o projeto mecânico definitivo do dispositivo ISF final para a conformação incremental das chapas (*Incremental Sheet Forming*), buscando assegurar, obviamente, que a pesquisa não comprometa a integridade da máquina-ferramenta e nem dos equipamentos de suporte ao projeto.

3.2 DISPOSITIVO ISF PILOTO E MÁQUINA-FERRAMENTA

Inicialmente, para se avaliar o comportamento dos principais parâmetros de processo, foi projetado e fabricado um dispositivo ISF piloto em aço SAE 4140, com tratamento térmico, FIGURA 24, cujas especificações técnicas podem ser observadas no mesmo desenho.

FIGURA 24 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO DISPOSITIVO ISF PILOTO (SAE 4140, TRATADO TERMICAMENTE).



FONTE: O autor.

A ferramenta utilizada para este teste foi um punção de metal-duro K40, topo esférico, com diâmetro de 5mm e haste também de 5mm, com revestimento de carbonitreto de titânio alumínio, AlTiCN, FIGURA 25. A máquina-ferramenta foi o centro de usinagem CNC ROMI DISCOVERY, modelo 4022, disponível no laboratório de fabricação do departamento de engenharia mecânica da UFPR, FIGURA 5.

FIGURA 25 - PUNÇÃO SEMIESFÉRICO UTILIZADO NO ENSAIO PILOTO, DIÂMETRO 5MM.

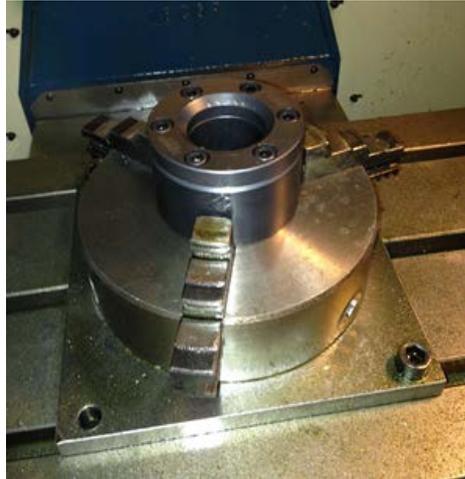


FONTE: O autor.

Os corpos de prova utilizados foram chapas de aço ASTM A653 CS-A G90, laminadas a frio, com revestimento de zinco, na forma plana e com 70mm de diâmetro, sendo que a área útil para a aplicação da deformação 3D foi estabelecida em 50mm do diâmetro do corpo de prova. O disco restante, entre os diâmetros 50mm e 70mm, tornou-se a área utilizada para a fixação da chapa no dispositivo ISF piloto. O elemento prensa-chapa, ou grampo, foi acoplado ao corpo do dispositivo ISF piloto por 6 parafusos allen, FIGURA 24 na página anterior, e, na sequência, o dispositivo foi fixado à placa 3 castanhas, que está montada sobre a mesa da máquina (FIGURA 26). Esse conjunto de fixação apresenta grande rigidez mecânica, sem permitir qualquer deslizamento da chapa que está presa. Ou seja, foi validado o tipo de sistema de fixação prensa-chapa para o dispositivo ISF final.

Na FIGURA 26, observa-se o dispositivo ISF piloto utilizado nos ensaios preliminares montado sobre a mesa da máquina. Referido dispositivo foi adequadamente zerado, e seu centro alinhado com o eixo z da máquina, sendo a superfície superior da peça o seu plano zero. Isto é, a coordenada (0,0,0) está localizada no centro e na parte superior da chapa para todos os testes preliminares conduzidos.

FIGURA 26 - DISPOSITIVO ISF PILOTO MONTADO SOBRE A MESA DA MÁQUINA CNC.



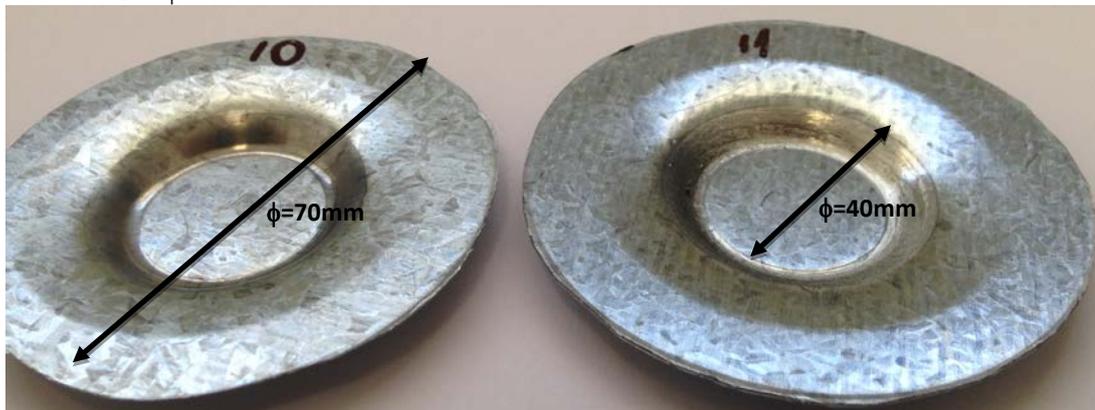
FONTE: O autor.

Ademais, foram selecionadas 2 espessuras de chapas de aço ASTM A653 CS-A G90 para a realização do teste piloto:

- Corpo de prova com espessura $t = 0,43$ mm
- Corpo de prova com espessura $t = 0,80$ mm

Na FIGURA 27 encontram-se 2 corpos de prova, a saber, os de números 10 e 11, testados para a devida averiguação das condições e parâmetros de processo, sendo ambos de geometria circular e tronco de cone impresso a partir do diâmetro $\phi=40$ mm.

FIGURA 27 - CORPOS DE PROVA UTILIZADOS NO ENSAIO PILOTO, GEOMETRIA CIRCULAR COM $\phi=70$ MM.

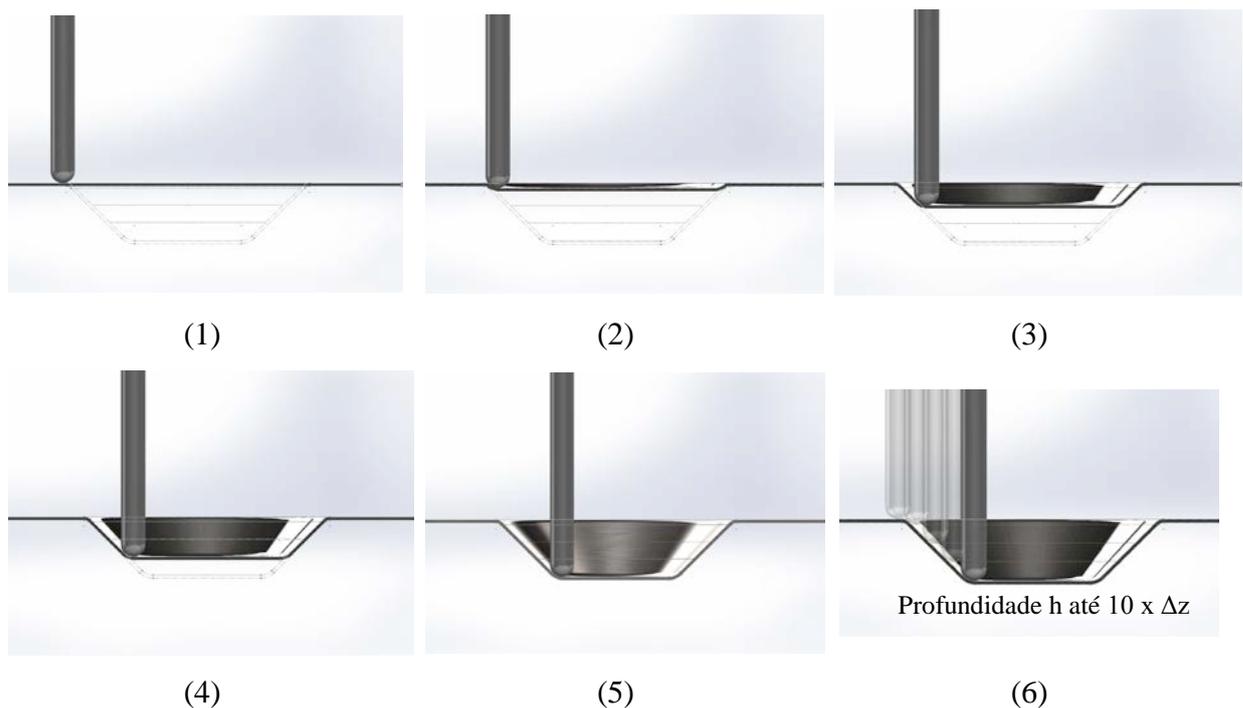


FONTE: O autor.

3.3 PUNÇÃO E ESTRATÉGIA DE DEFORMAÇÃO

A estratégia de deformação assumida para esse teste foi a geração de um tronco de cone, conforme se verifica na sequência de ilustrações da FIGURA 28, com profundidade h de até 10 vezes a espessura da chapa, FIGURA 28 (6). O diâmetro inicial da trajetória do punção foi mantido constante no valor de 40mm, e o ângulo de parede α da peça fixado em 45° . Nesse sentido, apenas as variáveis de processo dependentes da máquina, como avanço f , rotação n e incremento Δz , foram alteradas no programa no decorrer do ensaio preliminar. A espessura da chapa também pode ser combinada com os respectivos parâmetros, entretanto, o diâmetro da ferramenta e o meio de lubrificação foram mantidos constantes, qual seja, diâmetro de 5mm para o punção e sem lubrificação adicional na interface peça/ferramenta ao longo do processo de deformação.

FIGURA 28 - SEQUÊNCIA DE DEFORMAÇÃO CÔNICA IMPRESSA NO CORPO DE PROVA.



Fonte: O autor.

O dispositivo ISF piloto foi zerado em relação ao centro do disco da chapa, ou seja, o centro da ponta da ferramenta foi ajustado ao centro da chapa metálica que está montada no dispositivo. Observa-se, na FIGURA 29 (a), a utilização do relógio comparador para a devida etapa de zeramento da plataforma. Desse modo, a ferramenta que realiza a trajetória de deformação tem como ponto de referência, nas direções x , y e z , o centro superior da chapa,

onde se localiza a coordenada (0,0,0), qual seja, o zero peça. Na FIGURA 29 (d), encontra-se o punção se movimentando em trajetória circular concêntrica, gerando o tronco de cone a cada incremento em z, “ Δz ”.

FIGURA 29 - ETAPAS DO ENSAIO PRELIMINAR.



(a)



(b)



(c)



(d)

FONTE: O autor.

No intuito de investigar e determinar qual a melhor faixa de valores que as variáveis independentes – avanço f , rotação n e incremento Δz – poderiam assumir em decorrência da combinação máquina e espessura do corpo de prova, foram conduzidos testes que permitiram o proposto delineamento experimental final desses parâmetros, quais sejam, os níveis (-1), (0) e (+1) para cada fator. Cabe destacar que o material foi mantido constante e, sobretudo, as espessuras finas têm por objetivo assegurar a integridade da máquina-ferramenta e, simultaneamente, viabilizar a aquisição dos esforços dentro dos limites impostos pelo dinamômetro piezelétrico disponível no laboratório.

Na TABELA 1 apresentam-se as 10 primeiras combinações dos parâmetros de processo que foram aplicadas ao arranjo experimental do ensaio preliminar, sendo que foram conduzidos vários testes com o objetivo de encontrar as faixas mais seguras e mais adequadas aos principais fatores que controlam o fenômeno. Estes testes, permitiram, assim, convergir para a assertiva tomada de decisão acerca de quais fatores principais deveriam ser assumidos para o delineamento experimental e, por conseguinte, estabelecer os respectivos níveis baixo, central e alto.

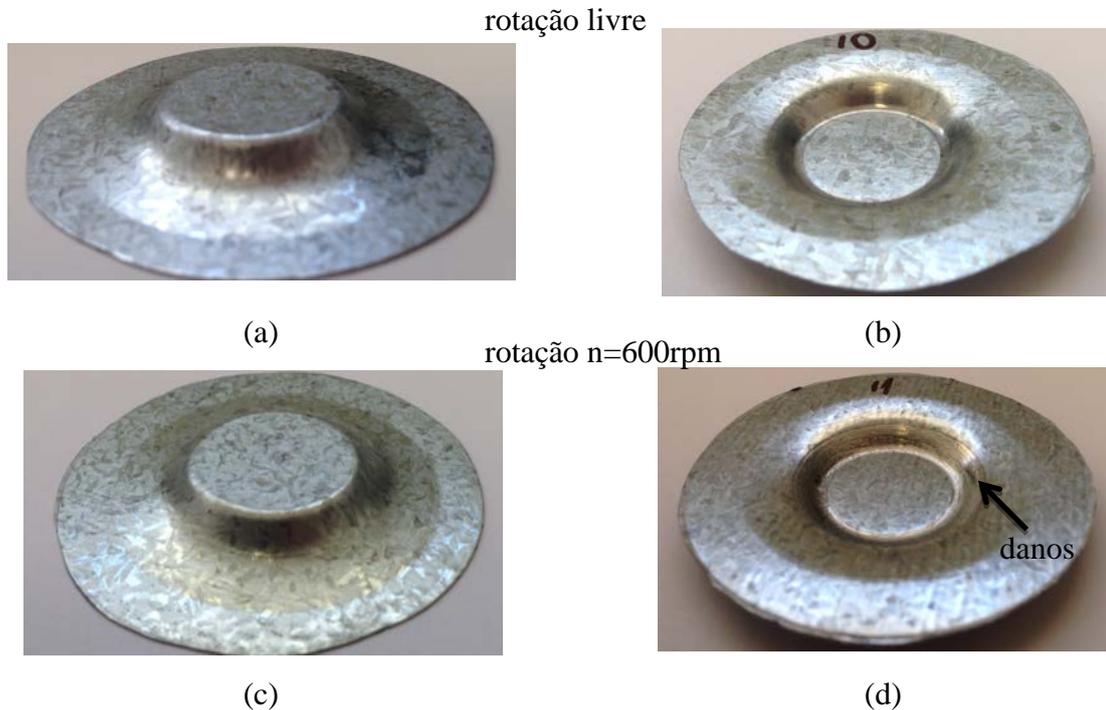
TABELA 1 - ARRANJO EXPERIMENTAL DO ENSAIO PRELIMINAR.

Corpo de Prova	Parâmetros do Teste				Corpo de Prova	Parâmetros do Teste			
	Δz (mm)	t (mm)	f (mm/min)	n rpm		Δz (mm)	t (mm)	f (mm/min)	n rpm
1	0,20	0,80	50	600	6	0,4	0,43	100	livre
2	0,20	0,43	100	600	7	0,6	0,43	100	livre
3	0,40	0,43	100	600	8	0,2	0,43	200	livre
4	0,60	0,43	100	600	9	0,2	0,43	300	livre
5	0,20	0,43	100	livre	10	0,2	0,43	100	livre

FONTE: O autor.

Em relação à rotação do punção, verificou-se que a condição mais apropriada consiste em deixar a ferramenta livre, ou seja, deixar o mandril “solto” na máquina, pois, dessa forma, o deslizamento entre as superfícies do punção e da peça tende a ser minimizado (FIGURA 30). Desse modo, eventuais danos que possam ocorrer na superfície que está sob deformação serão mitigados, embora a geração de temperatura seja menor e, por consequência, tendente a reduzir o nível de estampabilidade do material da peça.

FIGURA 30 - CORPOS DE PROVA EM AÇO ASTM A653 CS-A G90 DEFORMADOS NO ENSAIO PRELIMINAR.



FONTE: O autor.

3.4 FATORES PRINCIPAIS

O punção utilizado no teste piloto foi o de $d_t=5\text{mm}$, todavia, para o ensaio final, definiram-se valores de diâmetro a partir dessa dimensão testada, visando evitar a utilização de ferramentas demasiadamente frágeis em termos de robustez da haste. Na FIGURA 31, encontra-se um punção com 4mm de diâmetro que foi quebrado durante os testes preliminares. Diante disso, os valores definidos para esse fator principal foram os diâmetros de 5mm, 6mm e 8mm, todos em metal-duro K40 e com sugestão de aplicação do mesmo revestimento para favorecer o deslizamento na interface.

FIGURA 31 - PUNÇÃO DE $\phi=4\text{MM}$ QUEBRADO NO DECORRER DOS TESTES PRELIMINARES.



FONTE: O autor.

No caso do ângulo de parede α , testou-se, no ensaio preliminar, o ângulo de 45° . Todavia, como o processo de conformação incremental de chapas almeja inclinações maiores – o que torna viável a fabricação de peças mais complexas – optou-se, nesse sentido, por alguns ângulos superiores, de modo que o ângulo de parede α foi validado nos seguintes níveis: 40° , 50° e 60° .

Em relação à espessura da chapa e ao material do corpo de prova, mantiveram-se aqueles utilizados e validados no ensaio preliminar, incorporando, como ponto intermediário, a espessura $t=0,65\text{mm}$. A propósito, as dimensões das espessuras para os corpos de prova das chapas de aço ASTM A653 CS-A G90 são:

- Chapa para o nível baixo (-1) com espessura $t=0,43\text{mm}$
- Chapa para o ponto central (0) com espessura $t=0,65\text{mm}$
- Chapa para o nível alto (+1) com espessura $t=0,80\text{mm}$

Em relação ao incremento em z , Δz , foram validados os 3 níveis propostos para o experimento: $0,4\text{mm}$, $0,6\text{mm}$ e $0,8\text{mm}$. A profundidade máxima $h_{\text{máx}}$ de deformação estabelecida para o tronco de cone, originalmente (figura 28 (6), página 54), foi de até 10 vezes o incremento em z . Entretanto, como margem de segurança, definiu-se por utilizar $h_{\text{máx}}$ equivalente a $7 \times \Delta z$, o que resulta em: para Δz de $0,80\text{mm}$, uma profundidade $h_{\text{máx}}=5,6\text{mm}$, para Δz de $0,60\text{mm}$ uma profundidade $h_{\text{máx}}=4,2\text{mm}$ e, finalmente, para Δz de $0,40\text{mm}$ uma profundidade $h_{\text{máx}}=2,8\text{mm}$. Esses 3 arranjos foram testados sob a condição mais crítica em termos de espessura de chapa, ou seja, para a chapa mais fina, com espessura de $0,43\text{mm}$.

Nesses parâmetros, os corpos de prova apresentaram qualidade e integridade sem quaisquer evidências de defeitos ou danos, acarretando, assim, a validação dos 3 níveis propostos para o fator Δz .

Em relação ao avanço f , foram testadas as condições; 50mm/min , 100mm/min , 200mm/min e 300mm/min e, nesse sentido, a perturbação mais significativa observada foi para o parâmetro de 300mm/min , onde começaram a surgir pequenos danos superficiais visíveis ao corpo de prova, possivelmente em decorrência da excessiva taxa de deformação do material sob tais condições experimentais.

Já para os demais níveis o resultado obtido foi adequado em termos de integridade da peça e vibração do punção. Como o tempo de realização dos experimentos é inversamente proporcional ao avanço do punção, optou-se, nesse contexto, em se utilizar os maiores níveis

possíveis para o fator avanço da ferramenta f , assegurando a qualidade do trabalho e minimizando o tempo do percurso do punção. Logo, os níveis selecionados para o fator f foram: 150 mm/min, 175 mm/min e 200 mm/min.

3.5 PILOTO DE FORÇAS

Com o objetivo de validar as faixas dos valores definidos para os fatores principais em termos de esforço de conformação produzido e, desse modo, assegurar a integridade da ferramenta, da chapa deformada e do centro de usinagem CNC, realizou-se, preliminarmente, um piloto de forças para a devida medição das cargas geradas em condições extremas. Ou seja, fez-se uma varredura nas configurações limites de cada combinação com a finalidade de garantir a vitalidade do equipamento. Na TABELA 2, traz-se um exemplo de esforços mapeados no decorrer do ensaio piloto de forças.

Destaca-se, ademais, que a explicação técnica para cada conceito de força mapeada está contemplada no capítulo 4. Outro aspecto a ser ressaltado é o fato de que o esforço máximo verificado ao longo de várias análises não ultrapassou a barreira dos 2000N, ou seja, essa dimensão está dentro dos limites de segurança para os sistemas em uso e, principalmente, define também a faixa de grandeza das cargas adquiridas pelo dinamômetro. Esse ajuste é fundamental para a exata calibração do sistema piezoelétrico.

TABELA 2 - EXEMPLO DE ESFORÇOS MAPEADOS NO ENSAIO PILOTO DE FORÇAS.

dt(mm)=	5	t(mm)=	0,43	dz(mm)= 0,8	
$\alpha(^{\circ})=$	45	f(mm/min)=	200		
zero peça=	(x,0,0)	n=	livre		

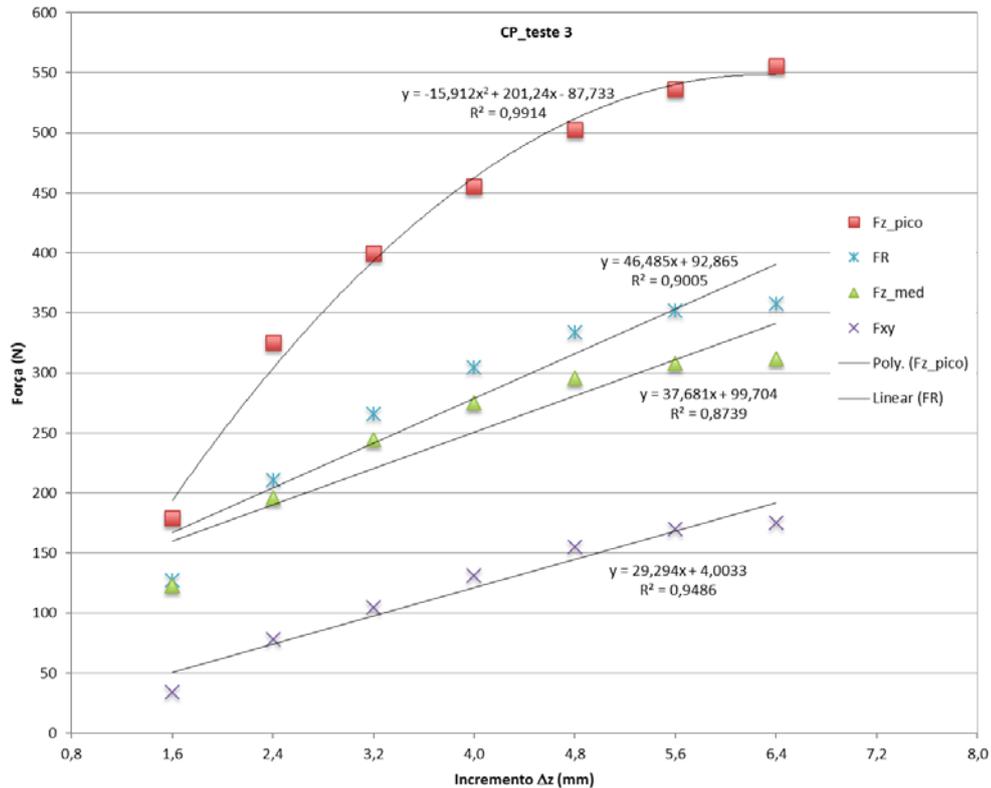
passo	z(mm)	Fz_pico	Fz_med	Fxy	FR
1	0,8	32,22	16,92	4,43	17,49
2	1,6	178,72	122,65	33,97	127,26
3	2,4	325,2	195,62	78,35	210,73
4	3,2	399,42	244,17	104,88	265,75
5	4,0	455,08	275,00	131,30	304,73
6	4,8	502,92	295,61	154,87	333,73
7	5,6	536,14	308,04	169,80	351,74
8	6,4	555,66	311,90	175,08	357,68

FONTE: O autor.

Adicionalmente, na FIGURA 32, observa-se um exemplo de gráfico de forças esperado, onde as condições de processo são as apresentadas na tabela anterior. Registra-se que o primeiro ponto em $\Delta z=0,8$, que é o primeiro passo do punção, os valores das cargas

geradas são pequenas, embora com grande oscilação entre as repetições. Diante disso, definiu-se, como estratégia, descartar o primeiro e o segundo passe de cada experimento nas análises futuras, uma vez que, apesar de não serem significativos em termos de carga, induzem forte oscilação ao sinal ruído.

FIGURA 32 - GRÁFICO DE FORÇAS ESPERADO, MODELO LINEAR E MODELO POLINOMIAL; CP_TESTE 3.

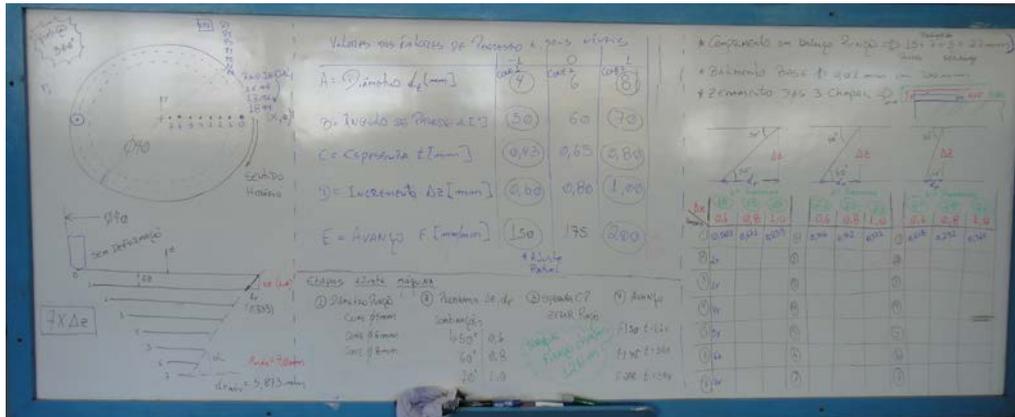


FONTE: O autor.

3.6 RESUMO

Ao final de toda essa explanação, verifica-se que foi possível validar os níveis dos fatores principais a serem assumidos na execução da pesquisa a partir dos ensaios preliminares e, sobretudo, aprimorar também o projeto do dispositivo ISF final para a rodada definitiva. Ilustrando como se deu, na prática, a busca pelos dados mais seguros e eficazes possível, na FIGURA 33, apresenta-se a fotografia do quadro de marcações e acompanhamento utilizado para a intensa discussão acerca dos testes e ajustes encaminhados ao longo do ensaio preliminar. No APÊNDICE G, página 244, pode-se observar o quadro de gestão à vista do experimento ampliado.

FIGURA 33 - QUADRO DE APOIO À TOMADA DE DECISÃO NO DECORRER DO ENSAIO PRELIMINAR.



FONTE: O autor.

Finalmente, na TABELA 3, verificam-se os valores atribuídos para cada fator principal em cada nível do planejamento experimental fatorial 2^5 completo. Assim sendo, tendo como limitações tecnológicas os equipamentos e os recursos financeiros disponíveis, foram 5 os principais fatores investigados: f , Δz , t , d_t e α . Isto posto, a partir do capítulo seguinte será apresentado o planejamento experimental fatorial 2^5 completo aplicado para alcançar os objetivos da presente pesquisa tecnológica, bem como a especificação detalhada dos materiais e métodos.

TABELA 3 - ARRANJO EXPERIMENTAL FINAL DO ENSAIO FATORIAL 2^5 .

(-1)	5	40	0,43	0,40	150
(0)	6	50	0,65	0,60	175
(+1)	8	60	0,80	0,80	200
Nível	Diâmetro	Ângulo	Espessura	Incremento	Avanço
	d_t	α	t	Δz	f
	(mm) ▾	(°) ▾	(mm) ▾	(mm) ▾	(mm/min) ▾

FONTE: O autor.

4 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, descreve-se o procedimento experimental utilizado nesta investigação científica. Aqui são apresentados o material e características do corpo de prova; os punções semiesféricos; a máquina e os acessórios; o dinamômetro; e o dispositivo ISF que compõem o conjunto de elementos para a conformação incremental das chapas (*Incremental Sheet Forming*). São demonstrados, ainda, os parâmetros de processo e o método estatístico aplicado. Finalmente, nesse tópico, apresenta-se o roteiro detalhado das etapas do experimento que organizam e sistematizam os ensaios e seus aspectos críticos.

4.2 MATERIAL E CARACTERÍSTICAS DO CORPO DE PROVA

O material utilizado na investigação foi o aço comercial de alta estampabilidade ASTM A653 CS-A G90, laminado a frio e com revestimento de zinco, nas espessuras 0,43mm e 0,80mm, fornecido pela Companhia Siderúrgica Nacional CSN, conforme norma ASTM A 653M de 2004. Esse tipo de chapa é bastante usual em produtos conformados. Nesse caso, a espessura da chapa é justamente fina para assegurar que as cargas geradas no processo de deformação não ultrapassem o próprio limite de aquisição de força do dinamômetro Kistler tipo 9129AA disponível e, ademais, não coloque em risco a integridade do fuso da máquina-ferramenta, o Centro de Usinagem ROMI DISCOVERY, Modelo 4022. Na TABELA 4, pode-se observar também a caracterização metalúrgica do principal material do corpo de prova utilizado. Dito material está disponível no laboratório de conformação mecânica da UFPR.

TABELA 4 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO MATERIAL DE BASE.

Material	Composição química (partes da massa em % máx.)			
	C	P	S	Mn
A653 CS-A G90	0,100 máx.	0,030 máx.	0,035 máx.	0,600 máx.

FONTE: Filho (2016).

As chapas com as espessuras 0,43mm e 0,80mm estão revestidas com zinco puro (extragal) G90 aplicado pela Companhia Siderúrgica Nacional CSN, conforme norma ASTM A 653M de 2004, e com as especificações de acordo com a TABELA 5.

A chapa com a espessura de 0,65mm está revestida com galvalume aplicado pela Companhia Siderúrgica Nacional CSN, cuja composição está descrita na TABELA 6. Salienta-se que essa chapa foi direcionada apenas ao ponto central do arranjo fatorial 2^5 , apesar de o revestimento ser diferente do das demais, não foi investigada essa diferença, esclarecendo-se que, apesar dos revestimentos serem distintos, nas condições de ensaio, não ocorreu influência significativa.

TABELA 5 - CARACTERÍSTICAS DO REVESTIMENTO PARA AS CHAPAS 0,43MM E 0,80MM.

Revestimento	Norma Padrão	Designação CSN	Peso(g/m ²)	Espessura(μm)
Zinco	ASTM A 653M (2004)	G90	275	38,51

FONTE: Filho (2016).

Essas amostras de 0,43mm e 0,80mm de espessura são majoritárias na condução do trabalho, pois referem-se aos níveis baixo e alto, respectivamente, do planejamento experimental fatorial completo. Entretanto, a amostra de 0,65mm de espessura é aplicada como ponto central no arranjo experimental para que seja possível testar a curvatura dos fatores no modelo estatístico estimado.

TABELA 6 - COMPOSIÇÃO EM PESO DO REVESTIMENTO GALVALUME PARA A CHAPA 0,65MM.

Al	Zn	Si
55%	43,5%	1,5

FONTE: Catálogo Galvalume CSN.

4.2.1 Caracterização Metalográfica

As amostras utilizadas para a análise metalográfica foram extraídas de recortes das chapas dos corpos de prova, seccionadas por meio de uma guilhotina (FIGURA 34). Em seguida, foram embutidas a quente com baquelite preta, lixadas progressivamente nas granulometrias 200, 400, 600, 800 e 1200, polidas com alumina 3μm e, finalmente, atacadas quimicamente. O ataque químico ocorreu com nital 5% (5ml de ácido nítrico para 100ml de

álcool etílico) tendo como principal finalidade a delimitação com clareza dos contornos de grão e, por conseguinte, a revelação da estrutura metalográfica do material.

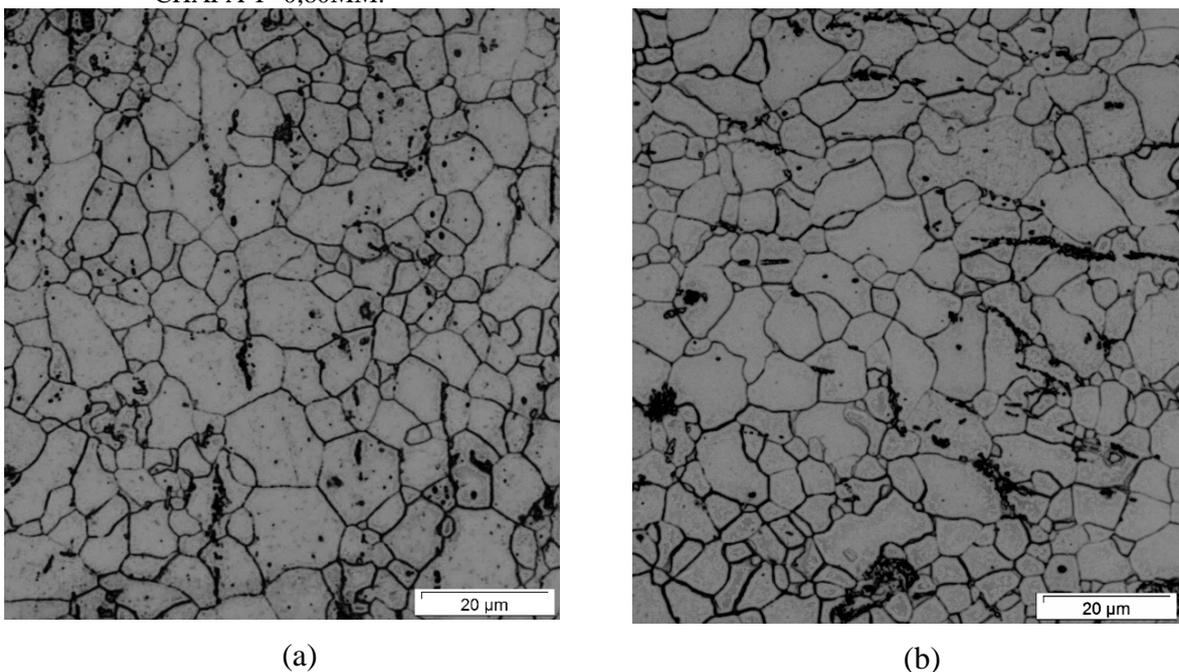
FIGURA 34 - (A) FRENTE DA CHAPA CP_26, (B) VERSO COM A REPRESENTAÇÃO DA SECÇÃO PARA AMOSTRA.



FONTE: O autor.

Como é possível observar na FIGURA 35 e no APÊNDICE C, a estrutura cristalina das amostras ASTM A653 CS-A, que são os corpos de prova majoritários, apresenta boa homogeneidade estrutural aparente, composta por grãos claros de ferrita, envoltos por finos carbonetos de ferro Fe_3C nos contornos de grão. As partes escuras, parecidas com manchas, ocorrem devido à oxidação da superfície após o ataque químico.

FIGURA 35 - METALOGRAFIA DAS CHAPAS DE AÇO: (A) CHAPA T=0,43MM; (B) CHAPA T=0,80MM.



FONTE: Filho (2016).

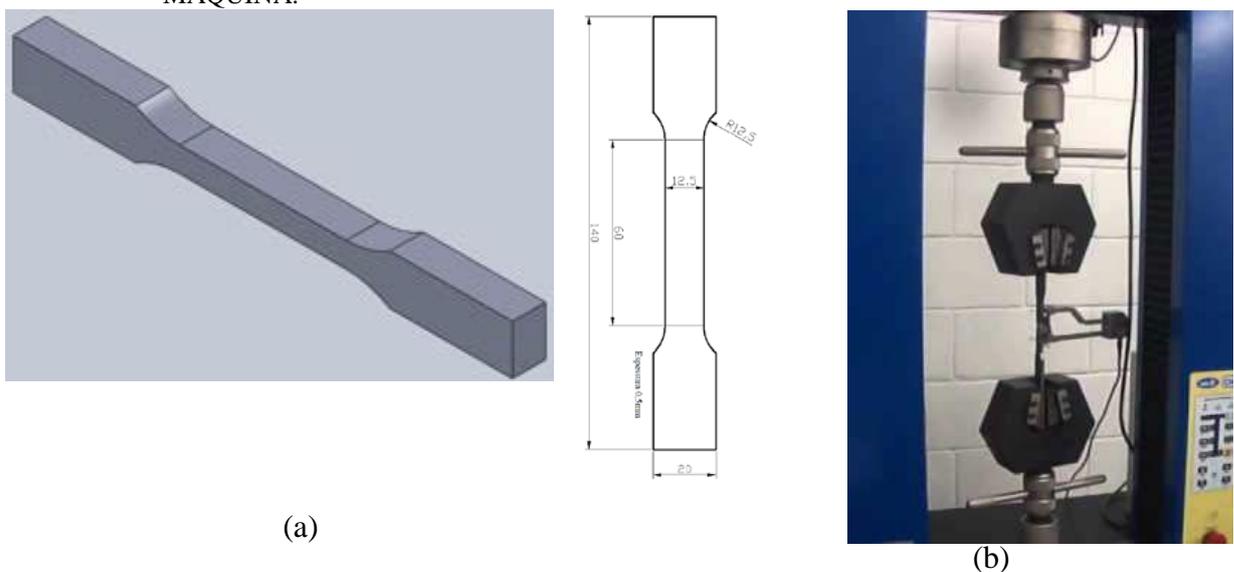
A partir das revelações do procedimento de metalografia das chapas, pode-se considerar que a estrutura cristalina é basicamente similar entre ambas favorecendo, por conseguinte, a condução das análises dos esforços no processo de conformação incremental das chapas, uma vez que as propriedades mecânicas das respectivas espessuras devem ser as mais próximas possíveis para não induzirem ruídos nos resultados obtidos com o experimento fatorial 2⁵.

4.2.2 Ensaio de Tração Uniaxial

As propriedades mecânicas do material foram obtidas a partir de ensaios de tração, realizados nos corpos de prova das chapas de espessuras 0,43mm e 0,80mm, nas direções de laminação 0°, em tiras de chapa de 20mm de largura por 250mm de comprimento, conforme padrão ABNT NBR ISO 6892-1:2013 (versão corrigida em 2015). Estas amostras foram montadas na garra da máquina, deixando, no mínimo, 140mm de haste livre (exemplo na FIGURA 36), (SANTOS, 2007).

Os corpos de prova forneceram informações relativas às propriedades mecânicas do material como: a tensão de escoamento LE; o limite de resistência LR; o alongamento Al e; o módulo de elasticidade E. Estas propriedades caracterizam o material quanto aos seus limites elástico e plástico (FILHO, 2004) e (DALEFFE, 2014).

FIGURA 36 - (A) CP DO ENSAIO DE TRAÇÃO; (B) MONTAGEM NA GARRA DA MÁQUINA.



FONTE: O autor.

Neste procedimento, foram utilizados 3 corpos de prova para cada tipo de chapa, calculando-se, dessa maneira, a média das propriedades mecânicas de cada material ensaiado, as quais podem ser verificadas na TABELA 7 – propriedades de estampabilidade do CP – e na TABELA 8 – propriedades mecânicas do CP ASTM A653 CS-A G90.

TABELA 7 - PROPRIEDADES DE ESTAMPABILIDADE DO CP ASTM A653 CS-A G90.

Parâmetros	CS-A – t=0,43mm	CS-A – t=0,80mm
r – Coeficiente de Anisotropia Normal	0,908	1,049
Δr – Coeficiente de Anisotropia Planar	-0,003	0,236

FONTE: Filho (2016).

TABELA 8 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO ASTM A653 CS-A G90.

Parâmetros	CS-A – t=0,43mm	CS-A – t=0,80mm
E – Módulo de Elasticidade (MPa)	*203000	*203000
ν – Coeficiente de Poisson	*0,31	*0,31
μ – Módulo de Rigidez (MPa)	77500	77500
δ – Densidade (g/cm ³)	*7,87	*7,87
LR – Tensão de Resistência (MPa)	231,275	250,250
LE – Tensão de Escoamento (MPa)	212,489	218,965
Al – Alongamento A ₅₀ (%)	44,424	47,227

*Segundo Yu (1999)

FONTE: Filho (2016).

Após o cálculo da tensão e da deformação verdadeira, foi possível encontrar o valor de k, coeficiente de resistência, e n, coeficiente de encruamento da EQUAÇÃO 9 e EQUAÇÃO 10. No APÊNDICE F, encontra-se o memorial descritivo dos valores obtidos. Desse modo, ambos os coeficientes – k e n (TABELA 9) foram obtidos utilizando o intervalo a partir de 10% da deformação plástica até a estrição.

TABELA 9 - PROPRIEDADES DA LEI DE POTÊNCIA NA DIREÇÃO DE LAMINAÇÃO 0° DO AÇO ASTM A653 CS-A G90.

Chapas (mm)	Coefficientes	Amostra 1 0°	Amostra 2 0°	Amostra 3 0°	Média
0,43	k (MPa)	499,151	482,084	443,946	475,060
	n	0,25648	0,26348	0,25285	0,257603
0,80	k (MPa)	454,6565	413,9832	430,102	432,9139
	n	0,23054	0,22449	0,23456	0,22986

FONTE: Filho (2016).

Desse modo, a partir da média dos valores de k e n na direção de laminação 0°, a equação de Hollomon que descreve o comportamento plástico do aço ASTM A653 CS-A G90 de espessura 0,43mm, pode ser expressa pela equação (9) abaixo:

$$\sigma = 475,060\varepsilon^{0,257603} \quad (\text{Equação 9})$$

Enquanto isso, para o aço ASTM A653 CS-A G90 de espessura 0,80mm, tem-se a seguinte EQUAÇÃO (10):

$$\sigma = 432,9139\varepsilon^{0,22986} \quad (\text{Equação 10})$$

Buscando assegurar a confiabilidade dos dados, foi aplicado um teste de hipótese para verificar se o resultado é confiável, isto é, se os materiais que compõem as espessuras 0,43mm e 0,80mm podem ser considerados com mesma propriedade mecânica em termos de dureza. Esse teste de hipótese pode ser verificado no APÊNDICE A.

4.2.3 Dureza do Material de Base

A dureza Rockwell do material de base foi obtida pelo Durômetro Digital Versitron® (FIGURA 37) localizado no Laboratório de Materiais e Superfícies LAMATS da UFPR, sendo este aparelho capaz de medir durezas em todas as escalas Rockwell gerais e de superfície. A medição da dureza foi realizada nas escalas B e F, conforme normas ABNT NBR NM ISO 6508-1:2008 e ASTM E18-15 em amostras de chapas não estampadas nas espessuras 0,43mm e 0,80mm. Essas escalas utilizam penetrador de esfera de aço com diâmetro de 1,5875mm e cargas de 100kg e 60kg para as escalas B e F, respectivamente.

FIGURA 37 - DURÔMETRO ROCKWELL VERSITRON®.



FONTE: O autor.

Já as imagens que permitiram a análise e medição das espessuras foram capturadas por intermédio de um microscópio ótico, marca Olympus BX51, também localizado no Laboratório de Materiais e Superfícies LAMATS da UFPR (FIGURA 38). O equipamento tem capacidade de capturar imagens com ampliação de 200X até 1000X, permitindo, assim, medir a espessura do revestimento.

Com o objetivo de analisar a dureza média das chapas ASTM A653 CS-A, realizaram-se os ensaios de dureza Rockwell F, conforme norma ABNT NBR NM ISO 6508-1:2008 e ASTM E18-15 em amostras não estampadas de chapas de espessura 0,43mm e 0,80mm. Nesse procedimento, foram coletados 6 dados de dureza de cada amostra, apresentado pequenas variações na medida de dureza, como consta no gráfico da FIGURA 39.

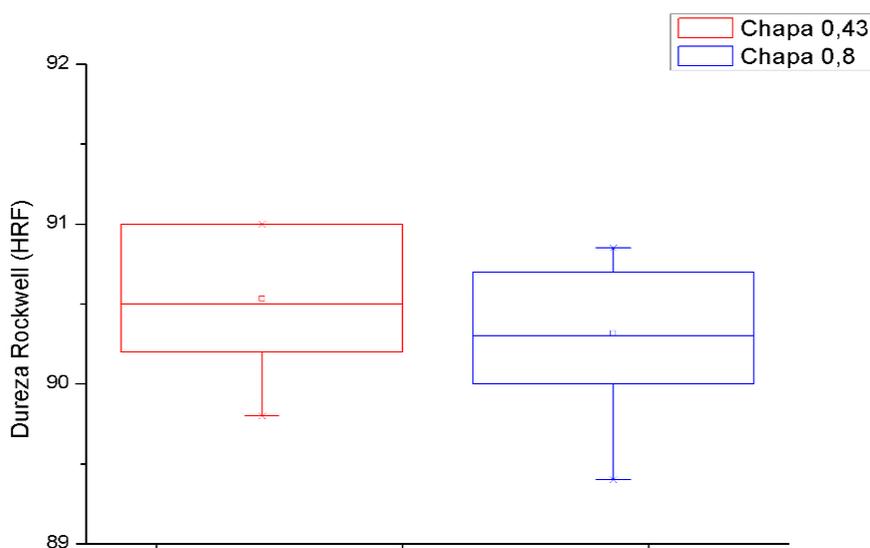
FIGURA 38 - MICROSCÓPIO ÓTICO OLYMPUS BX51.



FONTE: O autor.

Com o objetivo de analisar a dureza média das chapas ASTM A653 CS-A, realizaram-se os ensaios de dureza Rockwell F, conforme norma ABNT NBR NM ISO 6508-1:2008 e ASTM E18-15 em amostras não estampadas de chapas de espessura 0,43mm e 0,80mm. Nesse procedimento foram coletados 6 dados de dureza de cada amostra, apresentado pequenas variações na medida de dureza, como mostrado no gráfico a seguir.

FIGURA 39 - GRÁFICO BOXPLOT DAS AMOSTRAS DE DUREZA DAS CHAPAS ASTM A653 CS-A.



FONTE: O autor.

Na TABELA 10 abaixo, estão os dados de dureza coletados, obtendo-se uma dureza média conforme apontado.

TABELA 10 - DUREZA DAS CHAPAS ASTM A653 CS-A.

Espessura de Chapa	Dureza	
	Rockwell B	Rockwell F
0,80 mm	*58,63 HRB	90,32 HRF
0,43 mm	*59,07 HRB	90,53 HRF

*Equivalente em Dureza

FONTE: Filho (2016).

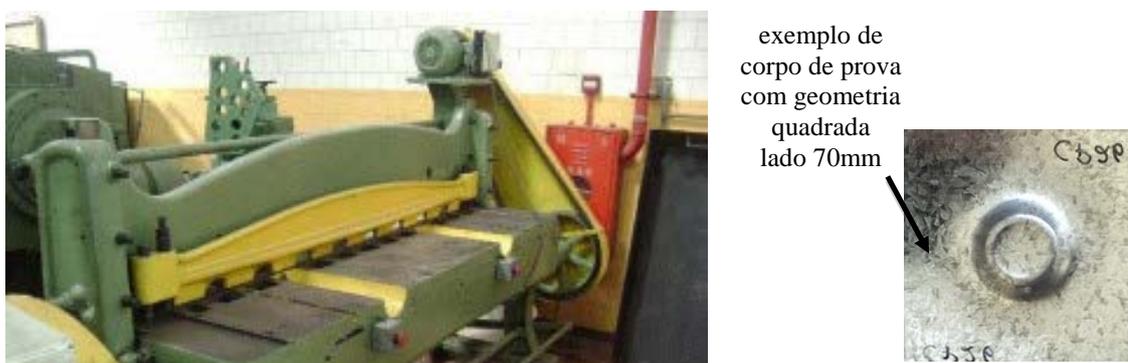
Os dados apresentados mostram que ambas as chapas apresentam grande semelhança entre as médias de dureza. Avaliando a hipótese nula de ambas as chapas apresentarem os mesmos valores de dureza, a análise estatística contida no APÊNDICE A traz um valor- $p=0,478$ sendo maior que 0,05, que corresponde a 5% de significância. Portanto, não há

evidências para rejeitar a hipótese nula. Sendo assim, pode-se constatar que não há diferença significativa entre as durezas das chapas.

4.2.4 Geometria do Corpo de Prova

A partir dos ensaios preliminares, foi possível, também, aperfeiçoar a geometria do corpo de prova, alterando-o do formato circular para o formato final quadrado. Esta mudança proporcionou maior aproveitamento das chapas oriundas do fornecedor e, em especial, maior produtividade no recorte dos respectivos corpos de prova por intermédio da guilhotina, (FIGURA 40).

FIGURA 40 - EXEMPLO DE GUILHOTINA UTILIZADA NO RECORTE DAS CHAPAS COM GEOMETRIA QUADRADA.



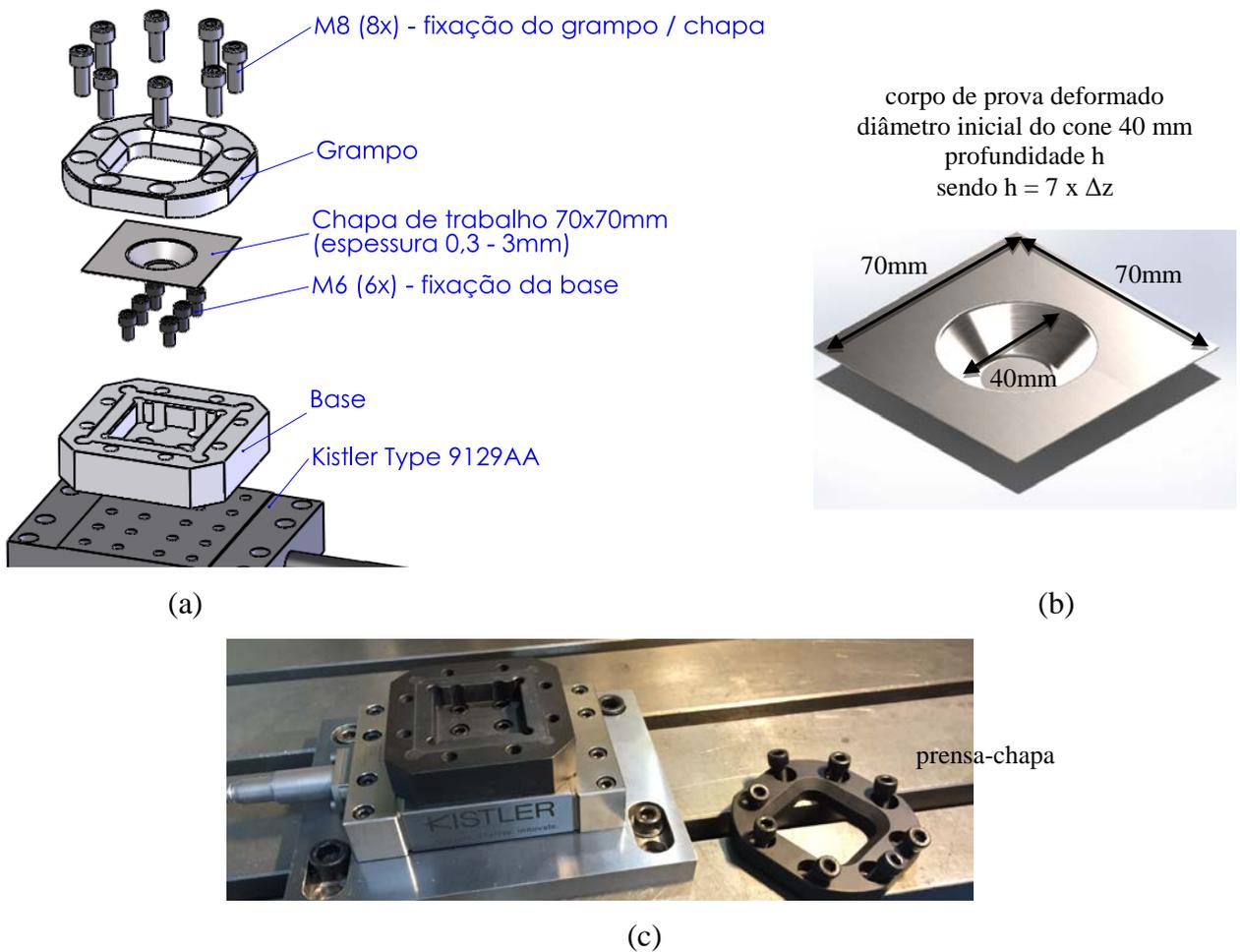
FONTE: O autor.

Além da geometria quadrada assegurar a mesma performance para os testes, ela facilita, sobremaneira, o processo de obtenção e montagem das chapas no dispositivo ISF final. Logo, o formato mais adequado para a realização da pesquisa, em termos de custo operacional, tempo de montagem e desmontagem e, por fim, adaptabilidade ao próprio dispositivo ISF final, é a geometria quadrada com lado de 70mm, na forma original plana. A seguir, na FIGURA 41 (a), apresenta-se a sequência de montagem e fixação do corpo de prova no dispositivo ISF final e, na FIGURA 41 (b), a deformação final esperada da chapa para cada teste. Registra-se que a estratégia de deformação segue o percurso circular, ou seja, o punção irá percorrer trajetórias circulares e concêntricas, proporcionando a geração de geometrias de tronco de cone, com passe no eixo z, Δz , fixo para cada teste. Assim sendo, o diâmetro inicial do cone a ser gerado, a partir da superfície plana da chapa, é de 40mm,

conforme se observa na FIGURA 41 (b). A profundidade máxima h foi de até 7 vezes o incremento em z , Δz .

Nesse sentido, cada corpo de prova proporcionou os dados de força de conformação nas direções x , y e z que foram adquiridos pelo dinamômetro Kistler 9129AA em cada passe completo de deformação da chapa.

FIGURA 41- DISPOSITIVO ISF PARA FIXAÇÃO DA CHAPA DE GEOMETRIA QUADRADA 70MM POR 70MM.



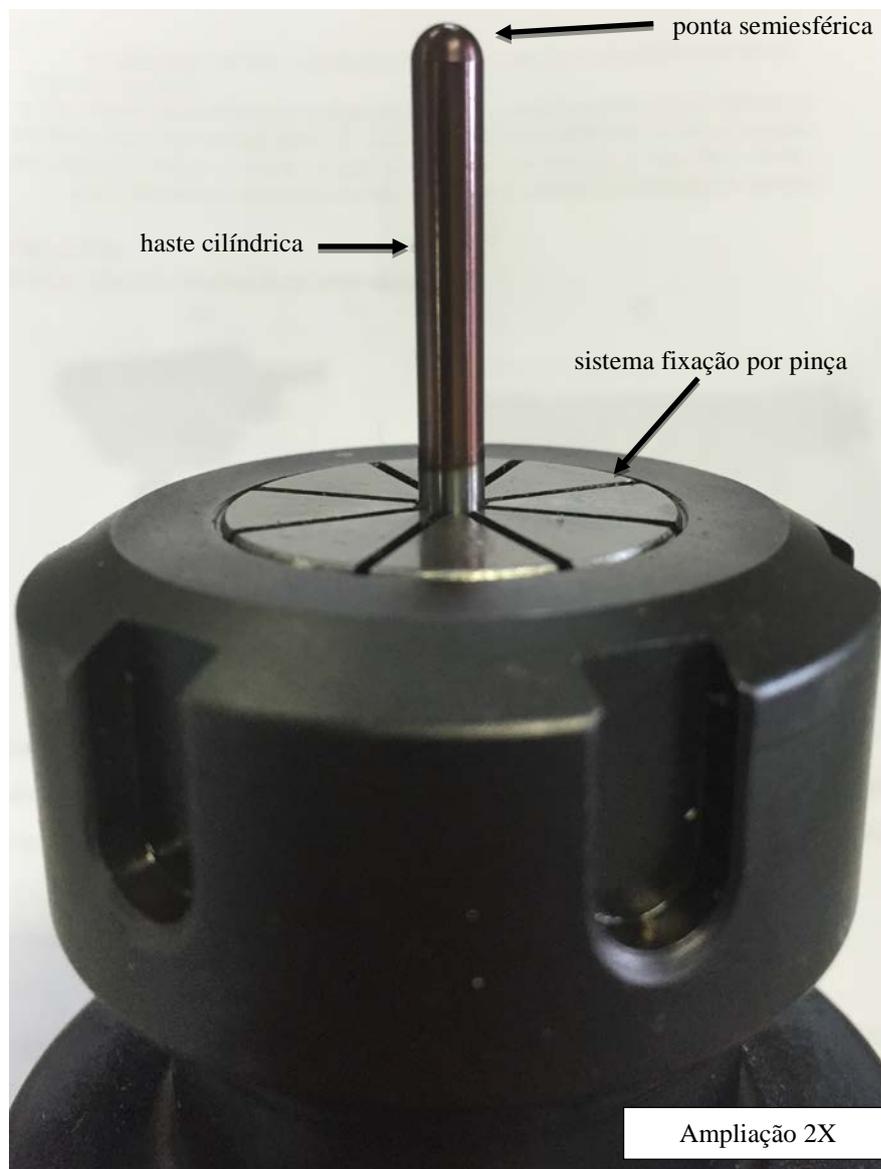
FONTE: O autor.

Na FIGURA 41 (c), tem-se o prensa-chapa desmontado do corpo principal do dispositivo ISF, bem como a plataforma piezoelétrica e a placa de suporte que acopla o respectivo conjunto à mesa do centro de uninagem CNC.

4.3 PUNÇÕES SEMIESFÉRICOS

Nesse trabalho experimental, foram utilizados 3 diâmetros d_1 para as ferramentas de conformação incremental contínua (*Incremental Sheet Forming*): 5mm, 6 mm e 8 mm, sendo que na FIGURA 42 observa-se, nitidamente, a ferramenta de 5mm de diâmetro. Destaca-se que a seleção definitiva das dimensões do fator principal diâmetro do punção foi decorrente da análise dos resultados obtidos com o ensaio preliminar descrito no capítulo 3.

FIGURA 42 - PUNÇÃO SEMIESFÉRICO MONTADO NO MANDRIL, AMPLIAÇÃO 2 VEZES.



FONTE: O autor.

Na tecnologia ISF, as ferramentas de deformação também são denominadas de punções, rotativos ou não, pois a ponta da ferramenta é esférica e, por conseguinte, deve imprimir apenas deformação mecânica 3D à chapa, sem qualquer tipo de remoção de material da mesma. Pode-se também verificar, na FIGURA 42, a caracterização da ponta da ferramenta no formato topo esférico ou semiesférico, e o sistema de montagem pinça e mandril. Assim sendo, o punção rotativo pode ser acoplado ao centro de usinagem como uma ferramenta de corte usual, sem qualquer requisito adicional para a sua utilização. Esse aspecto, portanto, é um dos grandes diferenciais do processo de conformação incremental de chapas, qual seja, a possibilidade de utilização de máquinas-ferramentas tradicionais para o processo de estampagem, sem a necessidade de grandes investimentos em equipamentos especiais como robôs ou sistemas hexapod (FIGURA 43).

FIGURA 43 - SISTEMA HEXAPOD UTILIZADO PELA FORD PARA IMPRESSÃO ISF 3D.



FONTE: Disponível em <<https://www.youtube.com/watch?v=iNQ40MYwZqw>> Acessado em 01/07/2016.

A classe de metal-duro das ferramentas é a ISO K40, obtida por metalurgia do pó e, na sequência, afiada, revistada e polida. Cabe ressaltar que a classe K apresenta boa condição de tenacidade, uma propriedade muito importante para a ferramenta nesse processo. Dessa maneira, na TABELA 11 encontram-se as características físicas e químicas dessa classe.

TABELA 11 - CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E QUÍMICAS DO MATERIAL DO PUNÇÃO.

Característica	Magnitude/Unidade
Dureza	1610 HV 30
Ruptura Transversal	3800N/mm ²
Densidade	14,45 g/cm ³
Tamanho de Grão	0,6µm
Composição Química	WC 90% e Co 10%

FONTE: FECIAL.

O comprimento da haste de cada bastão é de 70mm nos respectivos diâmetros supracitados. Nesse contexto, serão 3 bastões inteiros para cada diâmetro, totalizando 9 punções. Entretanto, como cada bastão tem 2 extremidades, será possível afiar ambos os topos no formato esferoidal, proporcionando, desse modo, o equivalente a 2 ferramentas por bastão, totalizando, assim, 18 ferramentas, 6 para cada diâmetro d_t .

Contudo, durante os ensaios preliminares verificou-se que as marcas de desgaste que surgem no punção de metal-duro são basicamente nulas, de modo que, para esse delineamento experimental, a ferramenta, por ser de metal-duro classe K40, não apresenta desgaste. Em razão disso, não será considerado esse efeito na análise dos resultados obtidos no decorrer da pesquisa científica.

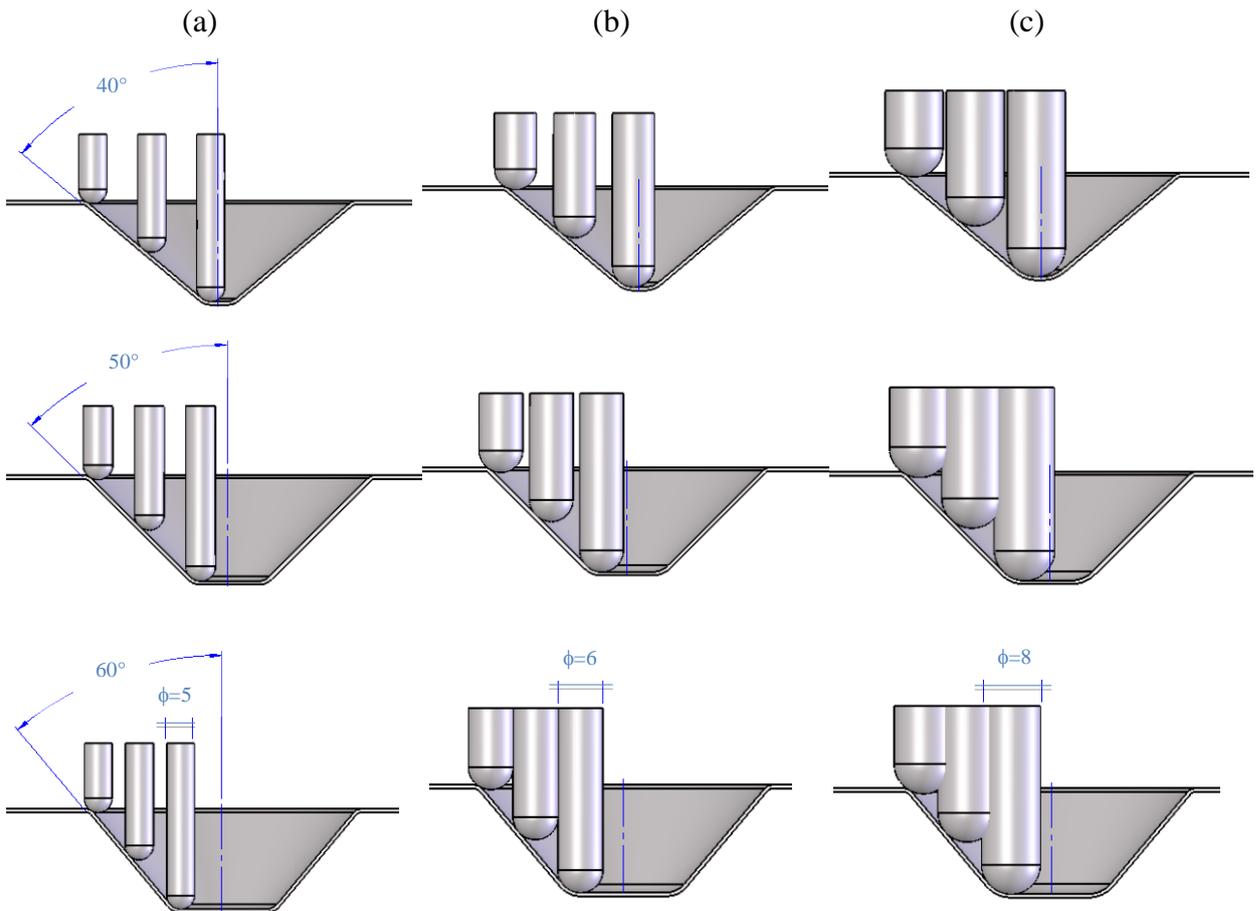
Na FIGURA 44, por sua vez, encontra-se uma representação esquemática dos punções e suas respectivas impressões produzidas nas peças.

Frisa-se que o revestimento aplicado nas ferramentas foi o AlTiCN, carbonitreto de titânio alumínio, por intermédio do processo de aspersão térmica, PVD (*Physical Vapour Deposition*). A dureza do revestimento está na ordem de 2600HV, a temperatura de referência máxima para o uso é de 500°C e o coeficiente de atrito em torno de 0,3 quando aplicado contra aço carbono. Após o revestimento da ferramenta, foi realizado o devido polimento.

Isto posto, serão 3 conjuntos de ferramentas nos diâmetros 5mm, 6mm e 8mm, com 3 elementos cada e com as extremidades revestidas. Cabe salientar que a utilização de ferramentas revestidas é deveras importante, pois reduz o atrito entres as partes deslizantes – chapa e topo esférico do punção –, melhorando, conseqüentemente, a estampabilidade do

processo e, aumentando o nível de deformação da peça possível de ser obtido (JESWIET, 2005). Essa aplicação é relevante já que, no processo de conformação tradicional, a utilização de meios lubrificantes tem forte influência nos resultados obtidos.

FIGURA 44 - MODELAGEM DOS 3 DIÂMETROS D_T DAS FERRAMENTAS, PARA OS 3 ÂNGULOS DE PAREDE A.



FONTE: O autor.

4.3.1 Sistema Porta-Ferramenta

Com o propósito de viabilizar a troca rápida das ferramentas na máquina, sem a necessidade de desmontar o conjunto punção/pinça/mandril, optou-se pela utilização de 3 portas-punções, ou seja, 3 conjuntos punção/pinça/mandril. Assim, pôde-se acoplar ao magazine do centro de usinagem CNC as 3 ferramentas, viabilizando-se a estratégia de troca rápida de ferramenta em cada teste, sem a necessidade de desmontagem e montagem do

sistema de fixação. Na TABELA 12 a seguir, expõe-se as respectivas especificações do cone, pinça e pino utilizados no conjunto.

TABELA 12 - DADOS TÉCNICOS DO CONE PORTA PUNÇÃO.

Elemento	Norma
Cone	MAS 403 BT40
Pinça	DIN 6499-C32 (ER32)
Pino de Fixação	MAS 407 BT-I 45°

FONTE: O autor.

Na FIGURA 45, verifica-se a foto das pinças utilizadas para a montagem em balanço dos 3 punções semiesféricos de 5mm, 6mm e 8mm e, na FIGURA 46, observa-se o conjunto cone/pinça/pino montado com a respectiva ferramenta, a qual será acoplada ao magazine de troca rápida da máquina CNC para o devido uso no processo de conformação incremental de chapas (ISF).

FIGURA 45 - PINÇAS ER 32 UTILIZADAS PARA A RÍGIDA FIXAÇÃO DOS PUNÇÕES.



FONTE: O autor.

FIGURA 46 - SISTEMA PUNÇÃO/PINÇA/MANDRIL PARA OS 3 DIÂMETROS D_T DAS FERRAMENTAS.

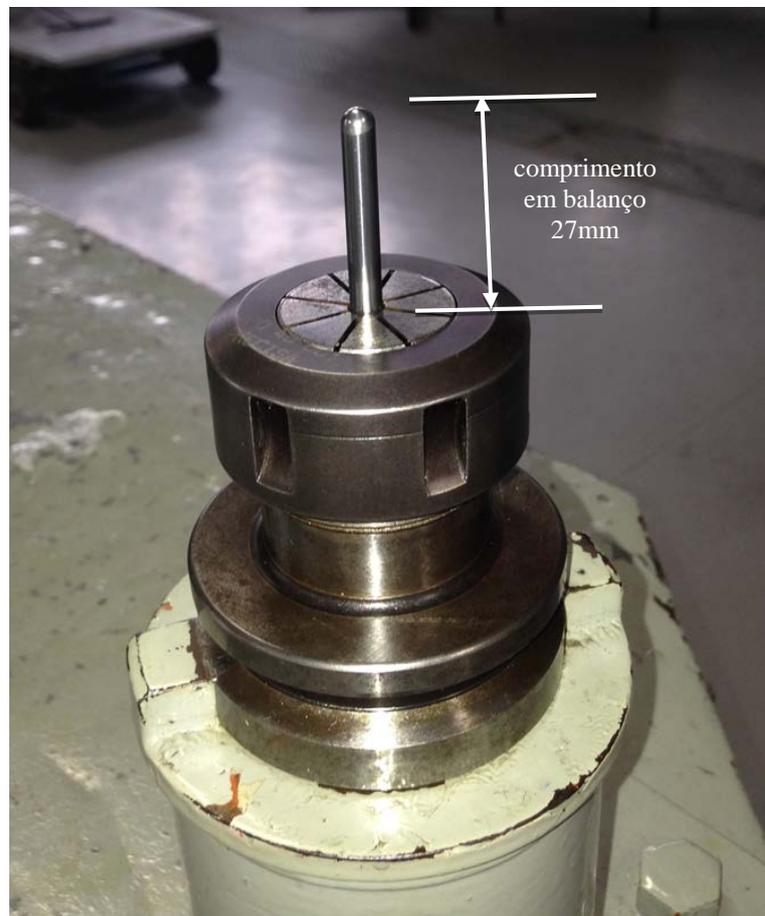


FONTE: O autor.

4.3.2 Montagem e Calibração do Conjunto

Antes da montagem dos conjuntos, foi verificada e assegurada a integridade dos elementos que os compõem, como pinça, porca e mandril. Uma vez aprovada a integridade de cada componente, foi então montado cada respectivo conjunto com seus elementos. O comprimento em balanço do punção foi calibrado em exatos 27mm – FIGURA 47 – para o adequado ajuste do zero ferramenta à estratégia de aproximação do punção ao zero peça e ao ponto de início da deformação (descida do punção na chapa).

FIGURA 47 - COMPRIMENTO EM BALANÇO PARA OS 3 DIÂMETROS D_T DAS FERRAMENTAS.



FONTE: O autor.

4.4 MÁQUINA E ACESSÓRIOS

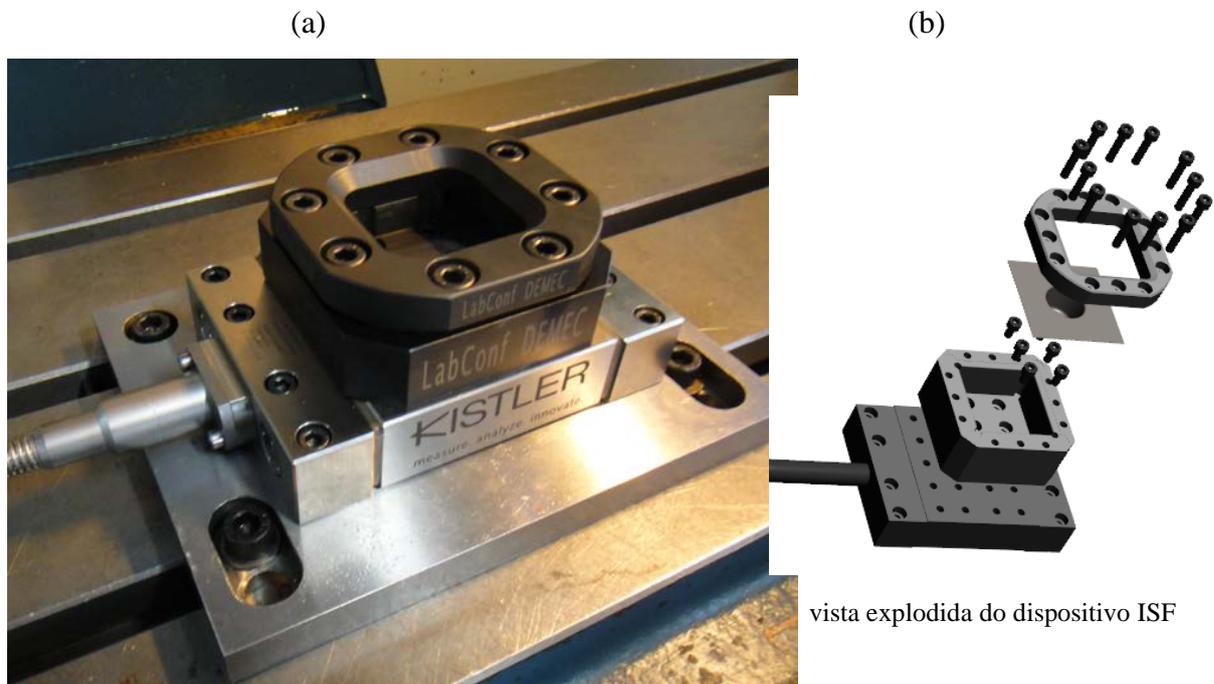
São basicamente 3 os equipamentos fundamentais para a realização do projeto experimental, a saber: a máquina-ferramenta CNC, para a execução do programa de conformação incremental da chapa; o dinamômetro piezoelétrico, para aquisição dos esforços

mecânicos nas direções x , y e z e; o dispositivo ISF (*Incremental Sheet Forming*), para a fixação do corpo de prova e a adequada obtenção dos dados de carga. A seguir, consta a descrição de cada um desses elementos.

4.4.1 Centro de Usinagem CNC

A máquina-ferramenta utilizada na condução desse delineamento experimental foi o centro de usinagem CNC ROMI DISCOVERY 4022, com comando MACH 9, disponível no laboratório de processos de fabricação do departamento de engenharia mecânica da UFPR (FIGURA 5). Todavia, na FIGURA 48 (a) e FIGURA (b) pode-se também verificar o dispositivo ISF montado sobre a mesa da máquina, enquanto na FIGURA 49, consta o painel de controle do equipamento. Destaca-se que, para essa pesquisa, a programação da máquina foi manual, diretamente no painel, uma vez que a estratégia de movimentação da ferramenta é simples, basicamente círculos concêntricos, formando, ao final, um tronco de cone com passe constante e profundidade h limitada. O passe da ferramenta na direção z é o incremento de deformação Δz que a chapa sofre a cada giro completo do punção.

FIGURA 48 - DISPOSITIVO ISF FINAL MONTADO SOBRE A MESA DA MÁQUINA ROMI DISCOVERY 4022.



FONTE: O autor.

FIGURA 49 - PAINEL DE CONTROLE MACH 9 DO CENTRO DE USINAGEM ROMI DISCOVERY 4022.



FONTE: O autor.

Na TABELA 13 abaixo encontram-se as especificações técnicas da máquina-ferramenta CNC utilizada na condução dessa investigação experimental.

TABELA 13 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO CENTRO DE USINAGEM CNC ROMI DISCOVERY, MODELO 4022.

Característica Técnica	Dimensão
Curso Longitudinal eixo X	599 mm
Curso transversal eixo Y	406 mm
Curso vertical eixo Z	508 mm
Resolução de Posicionamento	0,001 mm
Cone da árvore	ISO 40
Potência do motor principal	7,5 CV
Faixa de rotação	60 a 6.000 rpm
Avanço rápido dos eixos X, Y e Z	15/15/15 m/mim
Dimensões da mesa	360 x 840 mm
Potência	15 kVA
Comando CNC	Mach – 9

FONTE: O autor.

4.4.2 Programação NC

Foram desenvolvidos 9 programas NC's diretamente na máquina, de maneira que, nesse estágio do trabalho, não foi utilizado um software comercial CAD/CAM para a geração da estratégia de movimentação do punção. Na realidade, uma vez que o percurso é simples – circular, concêntrico e no formato de tronco de cone –, pôde-se, sem qualquer ônus à exatidão

dos movimentos da ferramenta, gerar os 9 programas aplicando apenas o parâmetro modal G2 para interpolação circular no sentido horário (FIGURA 50).

FIGURA 50 - EXEMPLO DE PROGRAMA NC PARA CONTROLE DA MOVIMENTAÇÃO DO PUNÇÃO EM G2.



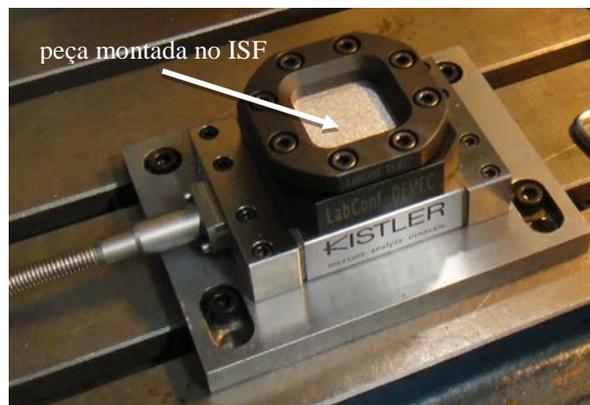
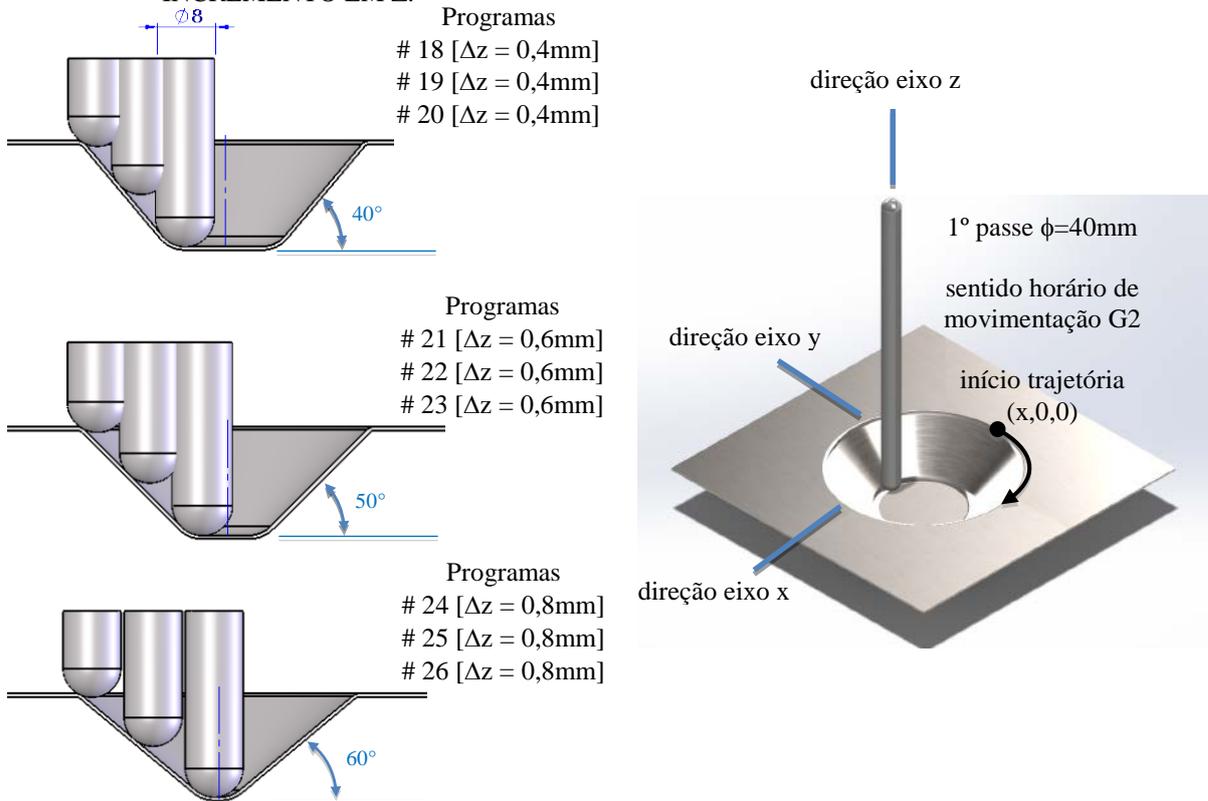
FONTE: O autor.

Assim, foi concebido diretamente na máquina um programa para cada combinação ângulo de inclinação da parede α e incremento no eixo z, Δz . Como todos os testes partem do mesmo ponto inicial sobre a chapa que está montada no dispositivo ISF – coordenada (x,0,0), FIGURA 51, coluna da direita – e, como o diâmetro de deformação para o 1º passe também permanece fixo e limitado em 40mm para todos os raios de ferramentas, tem-se apenas a variação do ângulo de inclinação da parede α e o incremento no eixo z, Δz , como parâmetros que acarretam, de fato, a geração de troncos de cones com geometrias distintas – FIGURA 51, coluna da esquerda.

Diante disso, a primeira ação para a correta seleção do programa é observar a combinação α e Δz da peça a ser ensaiada, conforme o arranjo experimental e, desse modo, carregar na máquina o respectivo programa que contempla esses fatores. Na sequência, ajustam-se, então, a velocidade de avanço f da ferramenta e, por fim, com extrema cautela, o zero peça do procedimento de acordo com a espessura do corpo de prova sob investigação e o diâmetro da ferramenta.

É importante a observância ao diâmetro do punção em uso, pois, o limite da circunferência de deformação não pode ser ultrapassado, o que significa que o centro da ferramenta deve ser posicionado de tal forma que a extremidade no raio coincida, exatamente, com o diâmetro limite de 40mm do tronco de cone a ser formado na chapa.

FIGURA 51 - NÚMERO DO PROGRAMA PARA CADA COMBINAÇÃO ÂNGULO DE PAREDE E INCREMENTO EM Z.



FONTE: O autor.

4.4.3 Preparação e Calibração do Equipamento

Os cuidados na montagem e preparação dos equipamentos mecânicos antes do primeiro ensaio são fundamentais para assegurarem, sobretudo, a confiabilidade do sistema e, dessa forma, a integridade dos dados gerados ao longo do experimento, mitigando ruídos ao sinal. Na montagem do dispositivo ISF, a atenção maior está direcionada para a absoluta limpeza das superfícies de contato entre a mesa da máquina e a placa de suporte do

dinamômetro Kistler e, posteriormente, com o dispositivo ISF (FIGURA 51). O alinhamento da placa de suporte, da plataforma piezoelétrica e, principalmente, do dispositivo ISF com os eixos x e y da mesa da máquina também é crucial para a exata coincidência das direções de movimentação do punção com as direções de aquisição das cargas (FIGURA 52 (a)). A pressão de fixação dos parafusos, do mesmo modo, deve ser rigorosa e estabelecida em 15Nm para os elementos que compõem o dinamômetro Kistler, e em 12Nm para os parafusos do dispositivo ISF. Na FIGURA 52 (b), verifica-se a aplicação do torquímetro com o fito de, justamente, padronizar essa respectiva especificação técnica. O batimento do dispositivo ISF ao longo de seu comprimento permaneceu, no máximo, em 0,01mm para os 2 eixos, x e y, conforme FIGURA 52 (a).

FIGURA 52 - SEQUÊNCIA DE PREPARAÇÃO E CALIBRAÇÃO DO DISPOSITIVO ISF SOBRE A MESA DA MÁQUINA.



(a)



(b)



(c)

FONTE: O autor.

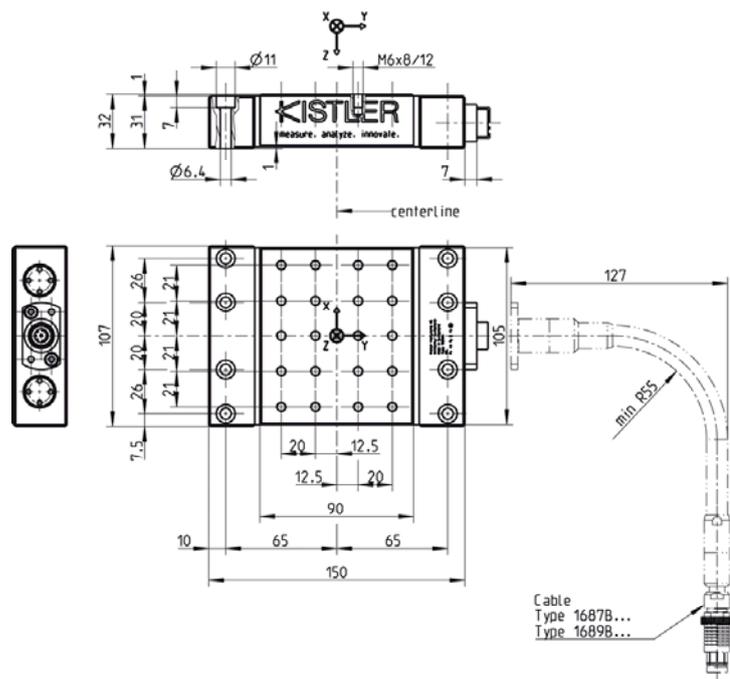
Por fim, a troca do corpo de prova no dispositivo ISF em cada teste torna-se um procedimento extremamente crítico pois, em especial, é essencial assegurar a limpeza do assento da peça no berço do dispositivo e, adicionalmente, garantir também a pressão de

fixação dos parafusos constante em 12Nm no decorrer de todas as trocas, conforme FIGURA 52 (c).

4.5 DINAMÔMETRO

Como meio para a aquisição dos esforços de conformação nas direções x, y e z, foi utilizado o dinamômetro piezoelétrico da marca Kistler, modelo 9129AA, FIGURA 53. O dinamômetro foi montado sobre uma placa de metal que está acoplada à mesa da máquina, mostrado na FIGURA 52 (a). O dispositivo ISF foi, então, assentado sobre a plataforma piezoelétrica, proporcionando, assim, a adequada condição tecnológica para a condução do experimento, conforme FIGURA 52 (b).

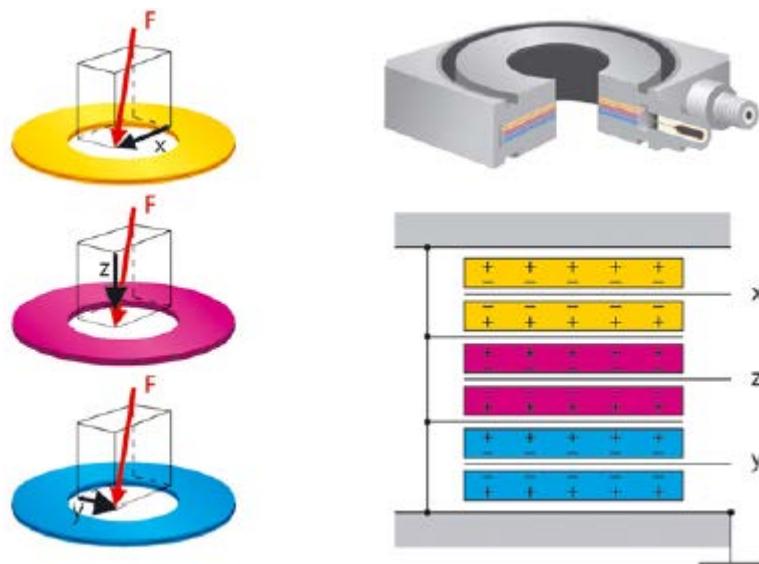
FIGURA 53 - ASPECTOS TECNOLÓGICOS DO DINAMÔMETRO PIEZOELÉTRICO KISTLER TIPO 9129AA.



FONTE: Manual de instrução dinamômetro Kistler 9129AA.

Assim, a força a ser medida é introduzida por meio de uma plataforma que cobre o corpo do equipamento Kistler e, dessa forma, distribuída ao longo do sensor disposto entre a placa superior e a placa de base do dinamômetro, FIGURA 54. O sensor de força contém três pares de placas de quartzo. Um deles é sensível à compressão na direção z, enquanto os outros dois, ao cisalhamento nas direções x e y, respectivamente. A medição, por sua vez, é praticamente livre de deslocamento. Dessa forma, a força introduzida no sensor é dividida em três componentes: F_x , F_y e F_z , conforme figura abaixo.

FIGURA 54 - PRINCÍPIO FUNCIONAL DOS CRISTAIS PIEZOELÉTRICOS.



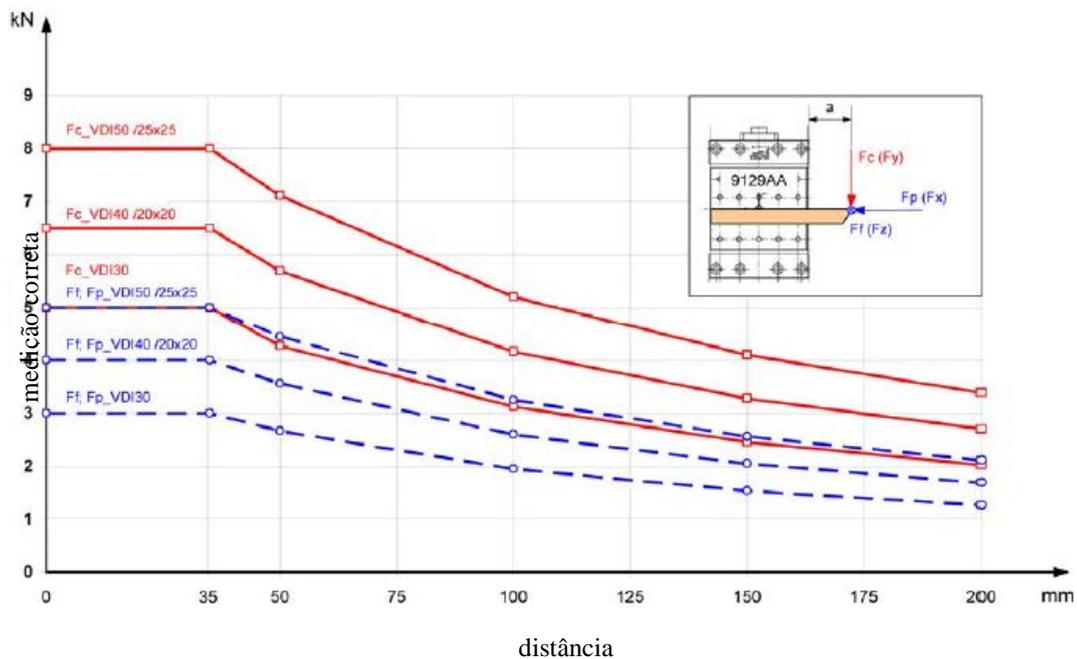
FONTE: Manual de instrução dinamômetro Kistler 9129AA.

Na medição da força com 3 componentes, os sinais individuais são alimentados em conjunto na conexão e ao longo do cabo de ligação tipo 1687B_000-545e. Outro aspecto importante a ser destacado, é o fato de que, dependendo da direção da força, cargas positivas ou cargas negativas surgem no processo, sendo valores negativos de carga quando as tensões percebidas no amplificador forem positivas, e vice-versa. Segundo o manual do fabricante do equipamento, as faixas limites de aquisição de carga são de -5kN até +5kN para os eixos x e z e -8kN até + 8kN para o eixo y.

Todavia, para esse delineamento experimental, as cargas não devem ultrapassar 2kN, haja vista exemplos de processos encontrados na literatura e, em especial, os resultados obtidos no ensaio preliminar descrito no capítulo 3. Outra característica importante a se ressaltar nesse equipamento é o limite da distância máxima em z que pode estar situado o

ponto de solicitação dos esforços. Nesse caso, a cota máxima em z, a partir da base do dinamômetro, deve ser de até 35mm, conforme FIGURA 55. Caso contrário, os dados obtidos perdem confiabilidade até a distância de 200mm. Esse aspecto acaba impondo, como distância máxima, para o posicionamento do corpo de prova a partir da base do dinamômetro, o limite de 35mm (FIGURA 59). Isso faz com que o volume de deformação do tronco de cone a ser empregado no ensaio torne-se relativamente limitado, posto que a profundidade máxima não pode exceder os 35mm recomendados, sob pena de perda de confiabilidade dos valores monitorados.

FIGURA 55 - MÁXIMA DISTÂNCIA AO PONTO DE MEDIÇÃO.

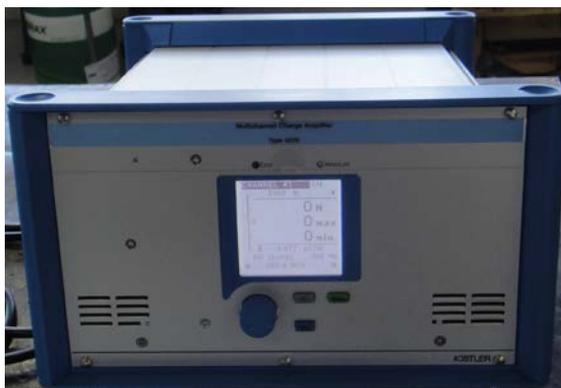


FONTE: Manual de instrução do dinamômetro Kistler 9129AA.

4.5.1 Amplificador de Sinal

O amplificador de sinal é um equipamento fundamental na cadeia de medição, e tem como principal função converter o sinal de carga (pC), a partir do sensor, para um sinal de tensão proporcional (V). Isso porque o cristal piezoelétrico gera um sinal em pC (pico Coulomb) quando sob solicitação, o qual é conduzido pelo cabo especial até o amplificador, que, ao final, o converte em V (*Volts*). O cabo utilizado nessa conexão é do tipo 1687B e o amplificador é do tipo multicanal com especificação 5070A_000-485e, também detalhado pelo manual do fabricante.

FIGURA 56 - AMPLIFICADOR DE SINAL MULTICANAL 5070A_000-485E.



FONTE: Manual de instrução do dinamômetro Kistler 9129AA.

Na FIGURA 56, pode-se observar a foto do amplificador utilizado nessa pesquisa.

4.5.2 Montagem e Calibração do Sistema

O sistema de aquisição dos dados de carga permaneceu montado e seguro no decorrer de todo o experimento, visando eliminar qualquer perturbação ao sinal gerado pelo eventual procedimento de montagem e desmontagem do sistema de aquisição de forças (computador/amplificador/cabos/dinamômetro). O amplificador de sinal e o computador ficaram posicionados ao lado da máquina estabelecendo, assim, uma conexão segura com o dinamômetro que estava localizado no interior daquela. Referida conexão foi estabelecida por meio de um cabo especial, com 3m de comprimento, já descrito no item anterior e observado na FIGURA 57. Os cuidados com a carga eletroestática presente nos cabos, conectores limpos e secos e, em especial, no rigoroso cumprimento das orientações indicadas pelo fabricante, foram fielmente executados durante todo o desenvolvimento da pesquisa.

FIGURA 57 - SISTEMA DE AQUISIÇÃO DOS DADOS, COMPUTADOR, AMPLIFICADOR DE SINAL E MÁQUINA.



FONTE: O autor.

Foram ainda calibrados os 3 canais de aquisição de acordo com a faixa de força esperada para o ensaio que é de até 2000N. Na FIGURA 58, constam os respectivos valores de sensibilidade em (pC) para cada cristal, no seu respectivo eixo, de acordo com as orientações de calibração do fabricante. Ressalta-se que referidos parâmetros foram ajustados ao amplificador de sinal. Destaca-se, também, que a taxa de amostragem foi estabelecida em 120Hz, ou seja, são 120 aquisições, em cada canal, a cada segundo, totalizando, assim 360 dados adquiridos por segundo de monitoramento. Esse valor foi definido com base na análise da quantidade de dados possível e razoável de ser manipulada num ambiente *Excel* para esse delineamento de experimento.

Isto é, como o tempo completo máximo de aquisição gira em torno de 45s, optou-se por limitar a quantidade de dados em aproximadamente 6000 dados por canal por teste. Dessa maneira, com a taxa de amostragem posicionada em 120Hz, foram gerados 5400 pontos para cada canal, os quais foram manipulados em software de processamento de valores, assegurando a precisão e exatidão das informações constituídas. Ou seja, não houve necessidade de computadores e softwares de elevada performance para a continuidade da análise dos dados.

FIGURA 58 - TELA DE AJUSTE E CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE FORÇA.

Canal	Label	Sensitivity	Unit	Measuring Range	Unit	Filter	Unit/V	
<input checked="" type="checkbox"/>	1	Fx	-8.035	pc/N	2000	N	300 Hz	200
<input checked="" type="checkbox"/>	2	Fy	-4.131	pc/N	2000	N	300 Hz	200
<input checked="" type="checkbox"/>	3	Fz	-8.077	pc/N	2000	N	300 Hz	200
<input type="checkbox"/>	4	Ch4		pc/N		N	1 kHz	0

Taxa de Amostragem (Hz) -

Número de Leituras do ensaio -

Salvar em

Arquivo

Responsável

FONTE: O autor.

Para essa pesquisa, inclusive, o software utilizado para gerenciar o sistema de aquisição de cargas foi desenvolvido internamente no Laboratório de Usinagem do Departamento de Engenharia Mecânica da UFPR, uma vez que é o mesmo aplicado aos testes em processos de usinagem em geral e, não obstante, concebido na linguagem MS Visual Basic e processado em um microcomputador PC (Pentium II 300MHz). Por fim, os dados gerados no decorrer de cada ensaio foram então gravados numa pasta pré-definida no HD do

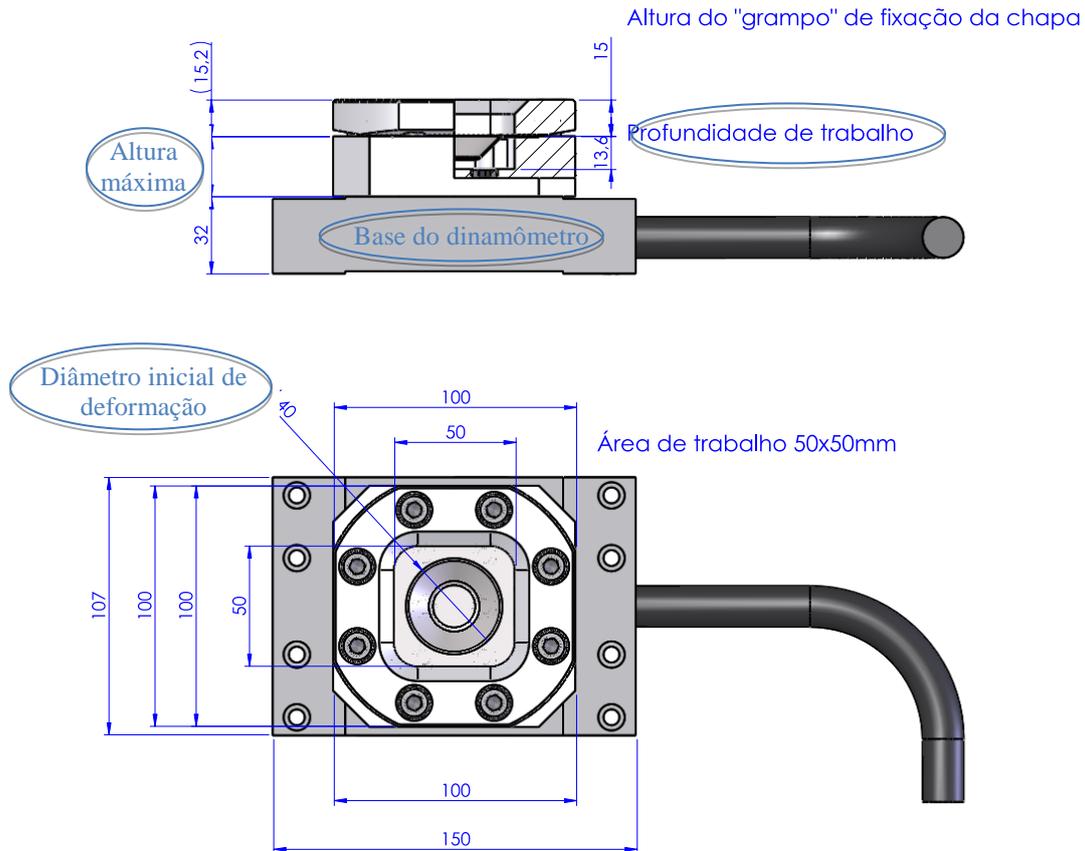
computador de suporte e, imediatamente, duplicados na nuvem para a devida segurança das informações produzidas.

4.6 DISPOSITIVO ISF

O dispositivo ISF final (*Incremental Sheet Forming*) para montagem do corpo de prova foi projetado e fabricado a partir das melhorias verificadas no ensaio preliminar. Como primeira delas, cita-se a adequação da profundidade de trabalho total da chapa h referente à altura máxima a partir da base do dinamômetro, com a qual o corpo de prova pode ser posicionado de maneira segura para o respectivo início da conformação incremental contínua. Este melhoramento foi importante porquanto garantiu a confiabilidade dos dados de carga, estabelecendo, conforme discutido no tópico 4.5, o limite de 35mm para essa cota. Com base nisso, optou-se, então pela cota de 25mm como posição inicial de montagem da chapa, garantindo-se, sobremaneira, a integridade dos dados produzidos no teste. Na FIGURA 59, encontram-se todas as especificações técnicas do dispositivo ISF final, assim como sua vista em corte, permitindo evidenciar, especificamente, a profundidade de trabalho de 13,6mm e a espessura da base de fixação do dispositivo que está sobre o dinamômetro piezoelétrico no complemento, contendo 11,4mm – totalizando os 25mm de altura máxima para o posicionamento do corpo de prova. Verifica-se, aliás, na mesma figura, o diâmetro inicial de deformação no valor de 40mm.

Na FIGURA 60, apresenta-se a montagem do dispositivo ISF final sobre a plataforma piezoelétrica e também o punção acoplado ao mandril (porta-ferramenta), assim como a chapa deformada ainda fixada pelo sistema prensa-chapa. Na secção em corte, ilustra-se o processo de deformação do corpo de prova e a profundidade máxima h de aprofundamento do punção.

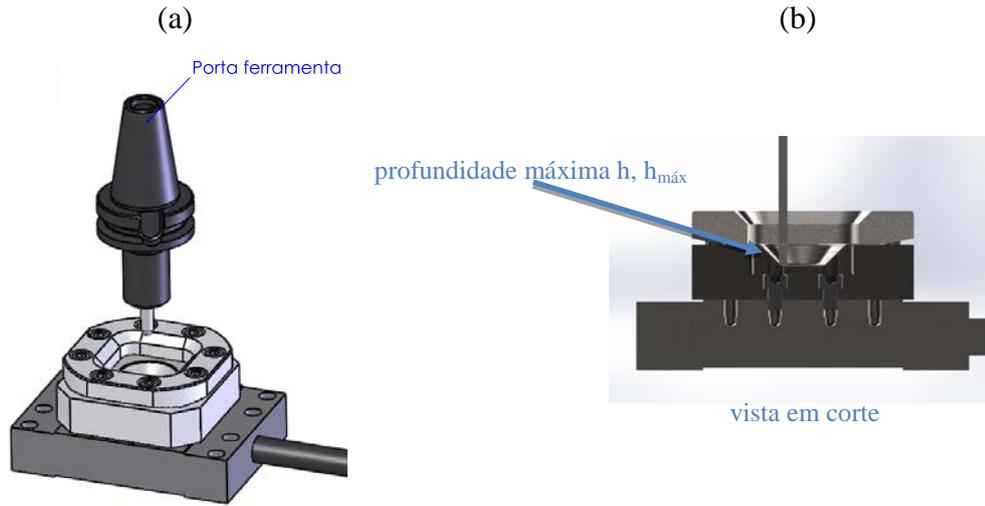
FIGURA 59 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO DISPOSITIVO ISF FINAL.



FONTE: O autor.

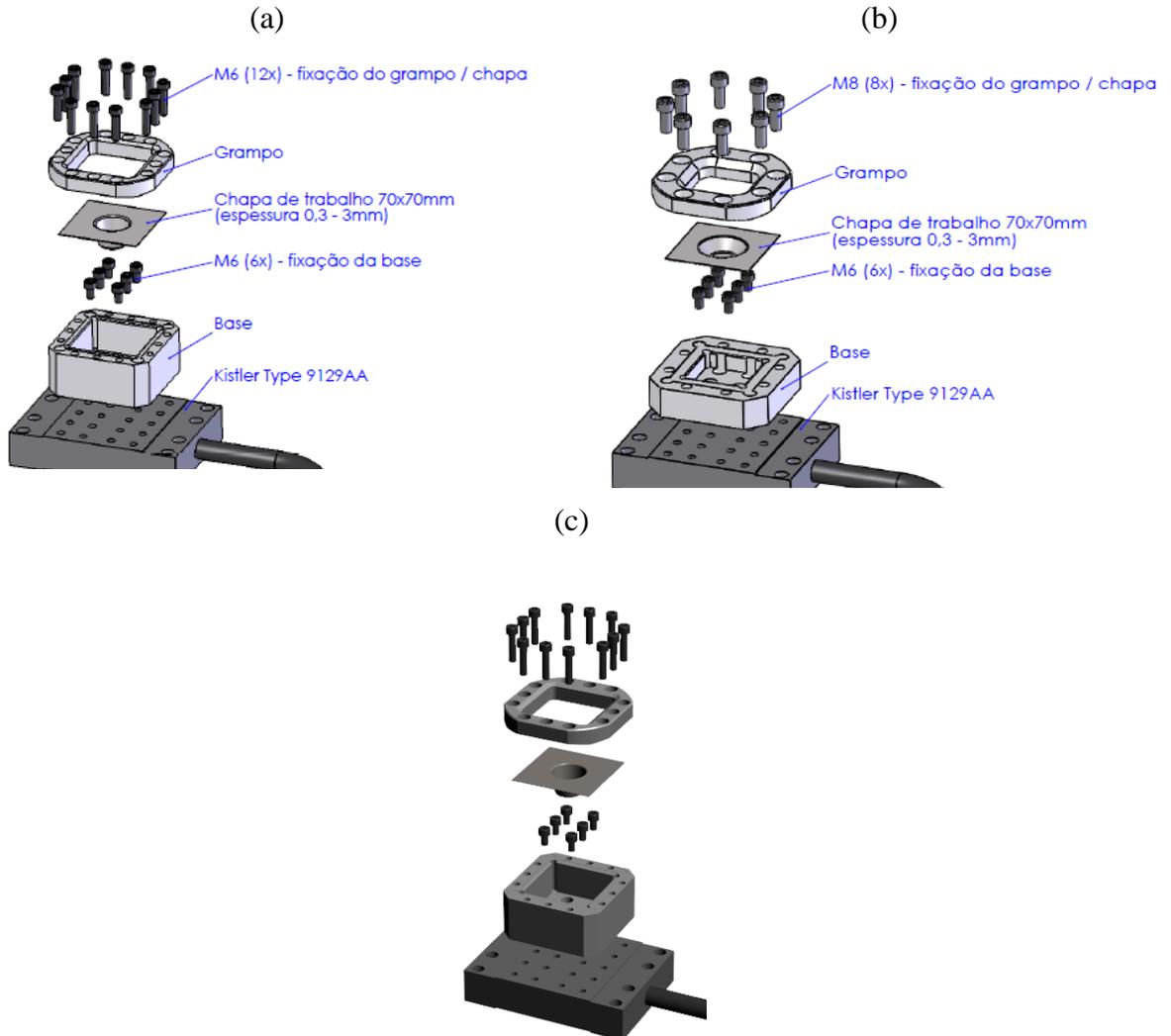
Outra melhoria aplicada em comparação ao projeto original foi a redução da quantidade de parafusos necessária para prender o grampo à base do dispositivo, sendo que, em vez de 12 elementos, foram empregados apenas 8 parafusos allen, conforme se destaca na FIGURA 61 (a) e FIGURA 61 (b). Esse aprimoramento gerou redução no tempo de montagem e desmontagem do grampo à base, porquanto se demora cerca de 10s apenas para a desmontagem de cada parafuso, e cerca de outros 20s para o aperto de cada um deles utilizando o torquímetro. Considerando, assim, que houve uma redução de 1/3 na quantidade de parafusos utilizados – equivalente à quatro parafusos –, otimizou-se o tempo em aproximadamente 2min por corpo de prova. Vale destacar que a redução na quantidade de parafusos não fragilizou a pressão de fixação, pois esta foi compensada pelo aumento no diâmetro do parafuso, que passou de M6 para M8. Na FIGURA 61 (c), apresenta-se uma visão explodida do dispositivo ISF final e do dinamômetro piezoelétrico.

FIGURA 60 - ASPECTOS CONSTRUTIVOS DO DISPOSITIVO ISF.



FONTE: O autor.

FIGURA 61 - AJUSTES NA ALTURA DA BASE E NA QUANTIDADE DE PARAFUSOS PARA O DISPOSITIVO ISF.



FONTE: O autor

Registra-se, por fim, que o material do dispositivo ISF manteve-se inalterado, qual seja, aço SAE 4140 tratado termicamente.

4.6.1 Troca Rápida dos Corpos de Prova

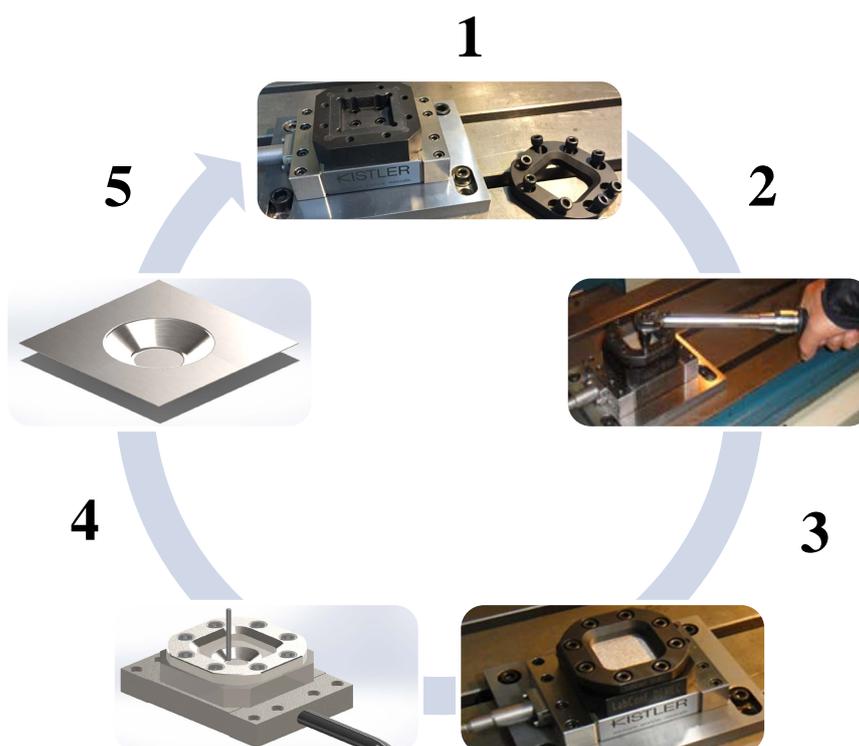
No tópico anterior, apontou-se a melhoria implementada no dispositivo ISF para otimizar o tempo de troca rápida do corpo de prova – redução de parafusos. Basicamente, a sequência das etapas pode ser observada na FIGURA 62, sendo que as respectivas ações e tempos estão contempladas na TABELA 14, onde o tempo total do ciclo de troca do CP gira em torno de 8min.

TABELA 14 - AÇÕES E TEMPOS NO PROCESSO DE TROCA RÁPIDA DO CORPO DE PROVA.

Ações	Tempos (min)
1 – Limpeza e acoplamento dos elementos	0,5
2 – Calibração dos parafusos (12Nm)	4,0
3 – Zeramento corpo de prova (programa)	0,5
4 – Conformação incremental da chapa (ISF)	1,0
5 – Desmontagem e marcação do CP	2,0

FONTE: O autor.

FIGURA 62 - SEQUÊNCIA DE TROCA RÁPIDA DOS CORPOS DE PROVA.



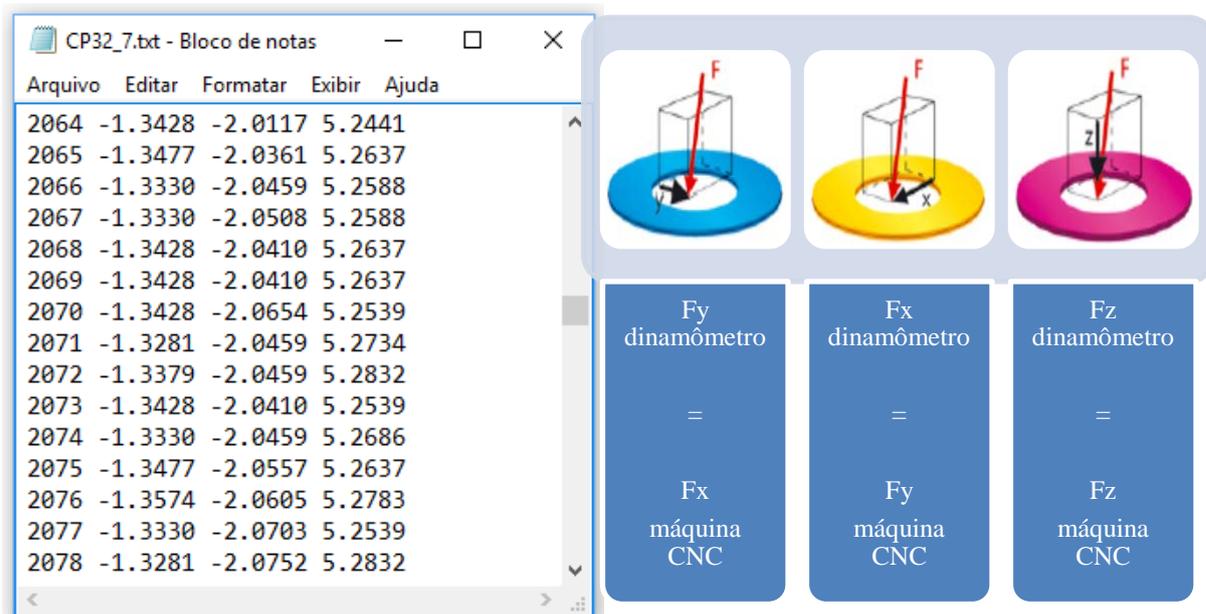
FONTE: O autor.

4.6.2 Estratégia de Aquisição e Registro dos Dados

Cada corpo de prova foi submetido a 7 passes, sendo que cada teste seguiu rigorosamente o planejamento fatorial 2^5 que se apresentará a seguir, no item 4.8, donde se extrai que a aquisição dos dados de força em x, y e z ocorre em cada passada do punção. Na FIGURA 28, observa-se o esquema de conformação incremental contínua por passe em z. Frise-se que cada degrau de deformação é monitorado e, em especial, ocorre a gravação dos dados na frequência de 120Hz. Portanto, a partir do diâmetro da circunferência em deformação e da velocidade do punção f (mm/min), foi possível estabelecer o tempo exato de aquisição dos valores. Deste modo, como estratégia para garantir a varredura de todos os testes e agilizar o processo de *set up* dos mesmos, optou-se, fundamentalmente, em fixar o tempo padrão de aquisição para todos os testes em 45s. Esse tempo produz 5400 pontos de aquisição por canal e garante o mapeamento de todas as combinações com relativa segurança.

Na FIGURA 63, verifica-se um exemplo dos valores adquiridos do ponto 2064 ao ponto 2078 do corpo de prova 32, no passe 7, sendo que a primeira coluna é exatamente a sequência dos pontos, ou seja, o tempo de aquisição, uma vez que cada 120 pontos equivalem a 1 segundo. A segunda, a terceira e a quarta colunas referem-se aos valores das forças nos eixos y, x e z da máquina-ferramenta. Esse trocadilho nos eixos é necessário para sincronizar as cargas do dinamômetro piezoelétrico com os eixos de movimentação do centro de usinagem. No quadro ao lado do exemplo tem-se essa lógica de conversão. Os dados produzidos são arquivados então na extensão *txt* e estão em *Volts*, sendo, exportados para um arquivo em *Excel* onde é viável todo o tratamento científico dos valores.

FIGURA 63 - BLOCO DE NOTAS COM OS DADOS BRUTOS GERADOS EM VOLTS NO DECORRER DO ENSAIO.



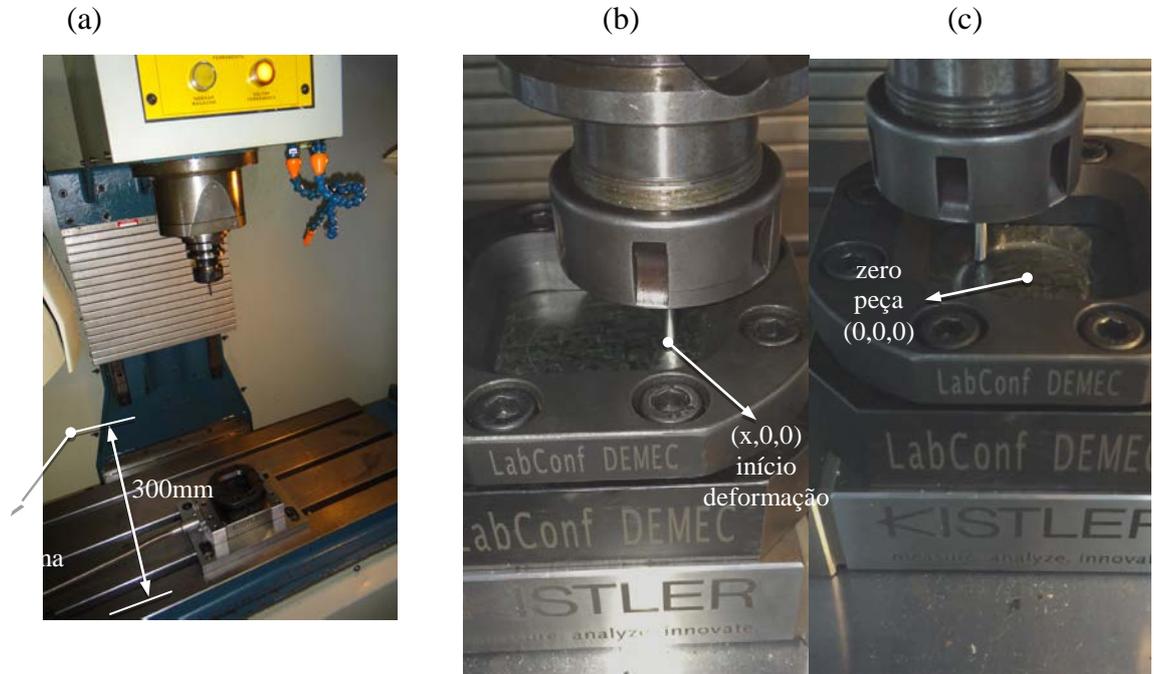
FONTE: O autor.

4.6.3 Percurso do Punção e Zeramento do Sistema

Conforme abordado anteriormente, o percurso de deformação do corpo de prova é circular, concêntrico e no formato de tronco de cone. Na FIGURA 64 (a), tem-se a representação do ponto zero máquina fixado à distância de 300mm acima da parte superior do dispositivo ISF para todos os punções utilizados na pesquisa. Ademais, o início do ciclo ocorre com o movimento do punção no eixo z em G0, até a altura de 5mm do corpo de prova e, então, o avanço ajusta-se para a velocidade programada no arranjo experimental em G1 e, desse modo, a ferramenta aprofunda até o respectivo incremento Δz do passe na superfície da chapa. Nesse instante, ou seja, a partir do contato inicial punção/chapa, ocorre um significativo impacto na direção z, acarretando, dessarte, as maiores cargas verificadas na investigação, sempre no eixo z e chamadas de Fz_pico . Entretanto, esse aspecto está discutido no item 5.2, e é uma das características mais importantes ao trabalho em curso. O início da deformação ocorre sempre a partir do ponto $(x,0,0)$, FIGURA 64 (b). O zero peça – o ponto $(0,0,0)$ – está localizado na parte superior da chapa e no centro da peça, FIGURA 64 (c). Na figura 64 (b), observa-se o punção iniciando o segundo passe de deformação na estratégia circular e, destaca-se aqui, que ao término do percurso circular, o punção afasta-se para a posição zero máquina a exatos 300mm acima da parte superior do dispositivo ISF. Isto posto,

finaliza-se o ciclo e permite-se seguir para o próximo passe com segurança, robustez e confiança no procedimento.

FIGURA 64 - REPRESENTAÇÃO DO ZERO FERRAMENTA, PONTO DE INÍCIO DE DEFORMAÇÃO E ZERO PEÇA.



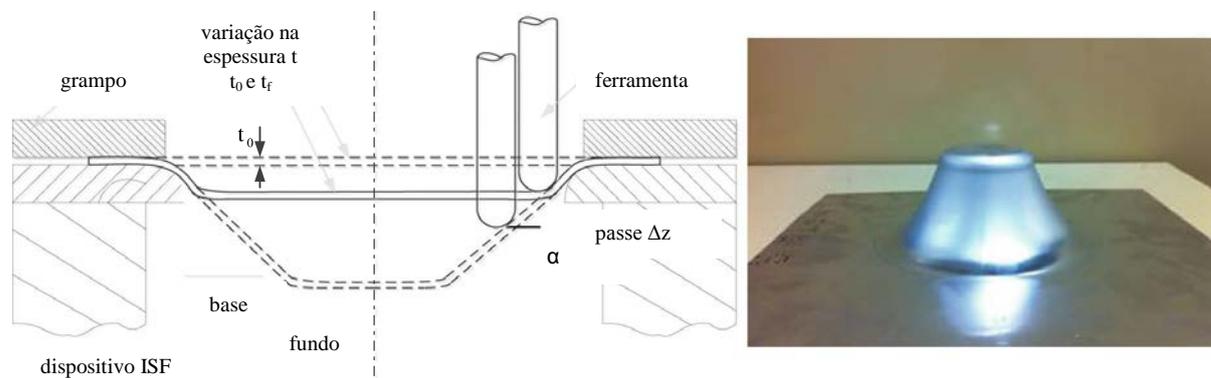
FONTE: O autor.

4.7 PARÂMETROS DE PROCESSO

Conforme já apresentado no capítulo 3, os fatores principais independentes selecionados e controlados no decorrer do experimento estão listados a seguir, com suas respectivas unidades entre colchetes:

- Diâmetro da ferramenta ou punção topo esférico d_t [mm]
- Ângulo de parede entre o plano da chapa e a linha de giração do cone α [°]
- Espessura da chapa t [mm]
- Incremento na profundidade z , Δz [mm]
- Avanço do punção ao longo da trajetória f [mm/min]

FIGURA 65 - PRINCIPAIS PARÂMETROS DE PROCESSO NA CONFORMAÇÃO INCREMENTAL DE CHAPAS.



FONTE: Yanle *et al.* (2014).

Na FIGURA 65 pode-se observar os principais parâmetros de processo na conformação incremental de chapas e, na TABELA 16, os valores específicos atribuídos aos níveis baixo, central e alto do arranjo experimental em desenvolvimento.

4.8 MÉTODO ESTATÍSTICO

Entre os métodos estatísticos possíveis para o tratamento experimental dos esforços de conformação incremental contínua foi avaliada a possibilidade de se utilizar Taguchi. Sabe-se que o principal objetivo desse método é otimizar a produção de produtos e/ou serviços com qualidade e a baixo custo de processamento.

Entretanto, como nessa pesquisa se investiga o comportamento do fenômeno do esforço de conformação incremental contínua, optou-se, por consequência, em aplicar o método estatístico fatorial completo. Assim, o projeto segue um rigoroso planejamento experimental do tipo fatorial completo 2^k , TABELA 15, visto que esse modelo de planejamento permite a avaliação em separado, dos efeitos individuais e dos efeitos de interação dos fatores e, sobretudo, possibilita estimar o modelo matemático que representa o fenômeno em questão, bem como a respectiva análise residual.

Um dos aspectos determinantes para a escolha desse método foi a realização do ensaio preliminar que corroborou, integralmente, para essa decisão, conforme descrito no capítulo 3. Destarte, nessa investigação, tem-se 5 fatores independentes, variando em 3 níveis, baixo, intermediário e alto, ou (-1), (0) e (+1), respectivamente.

TABELA 15 - TABELA DE SINAIS FATORIAIS PARA UM EXPERIMENTO FATORIAL 2⁵.

Trat.	Efeito Fatorial																																				
	I	A	B	AB	C	AC	BC	ABC	D	AD	BD	CD	ABD	ACD	BCD	ABCD	E	AE	BE	ABE	CE	ACE	BCE	ABCE	DE	ADE	BDE	CDE	ABDE	ACDE	BCDE	ABCDE					
(I)	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	
a	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	
b	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	
ab	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-
c	+	-	+	+	+	-	-	+	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	
ac	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	
bc	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	
abc	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
d	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	
ad	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	
bd	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	
abd	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-
cd	+	-	+	+	+	-	-	+	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	
acd	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	
bcd	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	
abcd	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
e	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	
ae	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	
be	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	
abe	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-
ce	+	-	+	+	+	-	-	+	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	
ace	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	
bce	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	
abce	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
de	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	
ade	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	
bde	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	
abde	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-
cde	+	-	+	+	+	-	-	+	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	
acde	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	
bcde	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	
abcde	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

FONTE: O autor

Assim sendo, o delineamento experimental proposto é 2⁵, totalizando 32 tratamentos, com possibilidade de 3 repetições. Registre-se que o nível intermediário tem como objetivo avaliar a linearidade do modelo para cada fator, conquanto, com a aplicação dessa metodologia estatística, é necessário também monitorar o comportamento da variável independente, ou seja, se a equação matemática que representa cada fator apresenta função linear ou, eventualmente, polinomial. Portanto, foram adicionados mais 10 tratamentos ao planejamento inicial, todos eles com os fatores ajustados ao ponto central (0). É justamente esse complemento que permitirá a avaliação da linearidade ou não de cada eventual variável significativa. O nível de confiança assumido para esse delineamento experimental foi de 99%. À vista disso, tem-se 32 tratamentos com 3 repetições, conforme a TABELA 16, totalizando 96 ensaios sob as extremidades e mais 10 testes no ponto central, ou seja, um arranjo completo de 106 rodadas. Sendo que cada teste levou em torno de 30 min entre preparação,

ensaio e desmontagem, o que culminou com aproximadamente 60 horas de ensaios. Uma corrida experimental realizada durante uma semana de trabalho.

Foram, por conseguinte, testadas as várias hipóteses para avaliar a significância de cada fator, ou seja, os testes fatoriais e, na sequência, a descrição estatística do modelo de regressão do fenômeno com seu erro experimental associado, tendo como base a respectiva análise das variáveis respostas Fz_pico e FR. O software utilizado para os cálculos da ANOVA e a consequente viabilização das análises estatísticas do método fatorial 2^5 foi o Minitab. Abaixo a figura da tela principal com a introdução dos dados iniciais.

FIGURA 66 - TELA PRINCIPAL DO SOFTWARE MINITAB COM O ARRANJO FATORIAL COMPLETO 2^5 MONTADO.

The screenshot shows the Minitab software interface. The top window is the 'Session' window, which displays the date and time (30/05/2016 20:41:50) and a welcome message. Below the message, it identifies the experiment as 'Experimento Fatorial Completo' and lists the following parameters: 5 factors, 106 trials, 1 block, and 10 total central points. The bottom window is 'Worksheet 1', which contains a table of experimental data with 17 columns and 14 rows.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17
	OrdemPad	OrdemEns	PtCentral	Blocos	dt	alfa	t	dz	f	Fz_pico P7	Fz_pico P6	Fz_pico P5	Fz_pico P4	Fz_Pico P3	FR P7	FR P6	FR P5
2	2	2	1	1	1	-1	-1	-1	-1	339,84	309,58	274,42	243,16	190,42	261,41	237,64	210,91
3	3	3	1	1	-1	1	-1	-1	-1	333,98	303,72	270,50	236,32	181,64	248,37	228,64	204,40
4	4	4	1	1	1	1	-1	-1	-1	380,86	347,66	314,46	273,44	225,58	276,89	253,13	227,20
5	5	5	1	1	-1	-1	1	-1	-1	829,10	765,62	707,04	624,02	507,82	706,68	646,56	589,39
6	6	6	1	1	1	-1	1	-1	-1	921,88	846,68	769,54	683,60	579,10	735,45	675,68	610,04
7	7	7	1	1	-1	1	1	-1	-1	939,46	852,54	766,60	659,18	523,44	787,81	717,61	638,88
8	8	8	1	1	1	1	1	-1	-1	996,10	912,10	817,38	713,86	591,80	790,11	728,07	657,63
9	9	9	1	1	-1	-1	-1	1	-1	503,90	484,38	455,08	409,18	349,60	347,86	339,63	318,95
10	10	10	1	1	1	-1	-1	1	-1	*	606,44	560,54	493,16	412,10	*	417,62	379,43
11	11	11	1	1	-1	1	-1	1	-1	588,86	565,42	523,44	468,76	391,60	391,24	368,90	337,88
12	12	12	1	1	1	1	-1	1	-1	725,58	684,58	627,92	547,86	452,14	459,00	423,17	379,22
13	13	13	1	1	-1	-1	1	1	-1	1242,18	1206,06	1133,78	1035,16	887,70	988,67	955,69	897,30
14	14	14	1	1	1	-1	1	1	-1	1446,28	1396,48	1305,66	1172,86	1001,96	1090,81	1047,94	976,50

FONTE: O autor.

4.8.1 Arranjo Experimental e Tamanho da Amostra

Na TABELA 16 verifica-se o arranjo experimental completo, com todos os tratamentos dos ensaios e seus respectivos níveis, assim como as variáveis respostas esperadas

F_x , F_y e F_z para as 3 repetições propostas. O tamanho final da amostra é de 106 rodadas, organizado conforme tópico anterior.

TABELA 16 - ARRANJO EXPERIMENTAL DOS 106 TESTES COM 3 REPETIÇÕES NO PLANEJAMENTO FATORIAL 2^5 .

Testes	Trat.	Fatores Independentes					Var. Resposta F_x			Var. Resposta F_y			Var. Resposta F_z			
		A	B	C	D	E	Y1	Y2	Y3	Y1	Y2	Y3	Y1	Y2	Y3	
1	33	65	(1)	-1	-1	-1	-1	-1								
2	34	66	a	1	-1	-1	-1	-1								
3	35	67	b	-1	1	-1	-1	-1								
4	36	68	ab	1	1	-1	-1	-1								
5	37	69	c	-1	-1	1	-1	-1								
6	38	70	ac	1	-1	1	-1	-1								
7	39	71	bc	-1	1	1	-1	-1								
8	40	72	abc	1	1	1	-1	-1								
9	41	73	d	-1	-1	-1	1	-1								
10	42	74	ad	1	-1	-1	1	-1								
11	43	75	bd	-1	1	-1	1	-1								
12	44	76	abd	1	1	-1	1	-1								
13	45	77	cd	-1	-1	1	1	-1								
14	46	78	acd	1	-1	1	1	-1								
15	47	79	bcd	-1	1	1	1	-1								
16	48	80	abcd	1	1	1	1	-1								
17	49	81	e	-1	-1	-1	-1	1								
18	50	82	ae	1	-1	-1	-1	1								
19	51	83	be	-1	1	-1	-1	1								
20	52	84	abe	1	1	-1	-1	1								
21	53	85	ce	-1	-1	1	-1	1								
22	54	86	ace	1	-1	1	-1	1								
23	55	87	bce	-1	1	1	-1	1								
24	56	88	abce	1	1	1	-1	1								
25	57	89	de	-1	-1	-1	1	1								
26	58	90	ade	1	-1	-1	1	1								
27	59	91	bde	-1	1	-1	1	1								
28	60	92	abde	1	1	-1	1	1								
29	61	93	cde	-1	-1	1	1	1								
30	62	94	acde	1	-1	1	1	1								
31	63	95	bcde	-1	1	1	1	1								
32	64	96	abcde	1	1	1	1	1								
97	central			0	0	0	0	0								
98	central			0	0	0	0	0								
99	central			0	0	0	0	0								
100	central			0	0	0	0	0								
101	central			0	0	0	0	0								
102	central			0	0	0	0	0								
103	central			0	0	0	0	0								
104	central			0	0	0	0	0								
105	central			0	0	0	0	0								
106	central			0	0	0	0	0								

FONTE: O autor.

Isto posto, conforme a abordagem anterior, os 5 fatores e seus respectivos níveis que foram ajustados no processo de conformação incremental contínua de chapas (*Incremental Sheet Forming*) estão listados na TABELA 17, estabelecendo a ordem dos fatores principais de “a” até “e”.

TABELA 17 - VALORES DOS FATORES PRINCIPAIS DE PROCESSO E SEUS RESPECTIVOS NÍVEIS.

Fatores	Níveis		
	-1	0	+1
a = Diâmetro d_t [mm]	5	6	8
b = Ângulo de parede α [°]	40	50	60
c = Espessura da chapa t [mm]	0,43	0,65	0,80
d = Incremento Δz [mm]	0,4	0,6	0,8
e = Avanço f [mm/min]	150	175	200

FONTE: O autor.

4.8.2 Sequência e Repetibilidade dos Testes

Apesar da recomendação metodológica de aleatorizar a ordem padrão dos ensaios sempre que possível, nesse caso, em especial, a sequência foi organizada para viabilizar a execução de todas as rodadas num período de tempo razoável. Caso contrário, se aleatória fosse a ordem dos ensaios, seria necessário o dobro de tempo estimado. Fora isso, os eventuais ruídos externos provenientes da variação na temperatura, na umidade, na iluminação ou em condições periféricas não aparentam significativa interferência na dinâmica dos testes, ou seja, essa decisão de não aleatorizar não amplifica sensivelmente os ruídos externos, tampouco os ruídos internos.

TABELA 18 - SEQUÊNCIA PROGRAMADA PARA REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS COM O RESPECTIVO TESTE FATORIAL ASSOCIADO.

Sequência	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
Teste	1	33	65	2	34	66	3	35	67	4	36	68	5	37	69	6	38	70	7	39	71	8	40	72	9	41	73	10	42	74	11	43	75

Sequência	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66
Teste	12	44	76	13	45	77	14	46	78	15	47	79	16	48	80	17	49	81	18	50	82	19	51	83	20	52	84	21	53	85	22	54	86

Sequência	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96
Teste	23	55	87	24	56	88	25	57	89	26	58	90	27	59	91	28	60	92	29	61	93	30	62	94	31	63	95	32	64	96

Sequência	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106
Teste	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106

FONTE: O autor.

Por isso, optou-se por executar a corrida das 3 repetições em cada tratamento, proporcionando, dessarte, agilidade, robustez e cadência na condução de cada subgrupo das repetições. Desse modo, partiu-se do ensaio número 1 e realizou-se todas as respectivas repetições dessa combinação, testes 33 e 65 e, na sequência, seguiu-se essa estratégia de maneira crescente até o último tratamento “abcde”, número 32 e suas repetições 64 e 96, conforme a TABELA 16. Por fim, foram então conduzidas as 10 repetições sob o ponto central. Na TABELA 18, verifica-se a sequência programada para o arranjo experimental fatorial completo 2^5 , onde sequência é a ordem dos ensaios e teste é a combinação do tratamento estatístico.

4.9 ROTEIRO DOS ENSAIOS E DETERMINAÇÃO DAS FORÇAS

A fim de estabelecer uma sistemática robusta e padronizada para todas as atividades durante a realização dos ciclos de testes, definiu-se, minuciosamente, todas as ações, de início ao fim, para cada atividade do planejamento experimental, sempre almejando a produção de cada corpo de prova de maneira rigorosamente controlada e repetida. Essa instrução de trabalho assegura a confiabilidade dos resultados obtidos e, em especial, elimina a possibilidade de eventuais erros grosseiros ou grandes dispersões do sinal ruído.

Conforme descrito anteriormente, o tempo de ciclo para cada ensaio é algo em torno de 30min. Na TABELA 19, encontram-se as etapas detalhadas para o roteiro dos ensaios e os respectivos tempos estimados em minutos. Registre-se que o evento que, definitivamente, produz informação tecnológica, é a etapa 8, com duração aproximada de 1min.

TABELA 19 - ROTEIRO PARA REALIZAÇÃO DOS CICLOS DE EXPERIMENTAÇÃO.

Etapa	Descrição do Procedimento	Ponto Crítico	t (min)
1	Limpar o assento do CP no dispositivo ISF e liberar a mesa	Elementos intrusos	0,5
2	Montar o CP conforme sequência dos ensaios	Espessura do CP correta	2,0
3	Ajuste final dos parafusos com torquímetro (12N.m)	Pressão de fixação	2,0
4	Chamar programa conforme sequência # dos ensaios	Programa correto	0,5
5	Verificar o zero peça para a espessura de chapa em uso	Cautela na movimentação	0,5
6	Preparar o sistema de aquisição dos esforços	Tempo de aquisição	1,0
7	Iniciar o teste para o passe P1	Sincronismo na liberação	0,5
8	Acompanhar o desenvolvimento do processo	Monitoramento de ruídos	1,0
9	Verificar a integridade do punção, do CP e dos dados gravados	Registro fidedigno	0,5
10	Repetir as etapas 6 a 9 nos demais passes, do 2º ao 7º	Registro fidedigno	18,0

continua

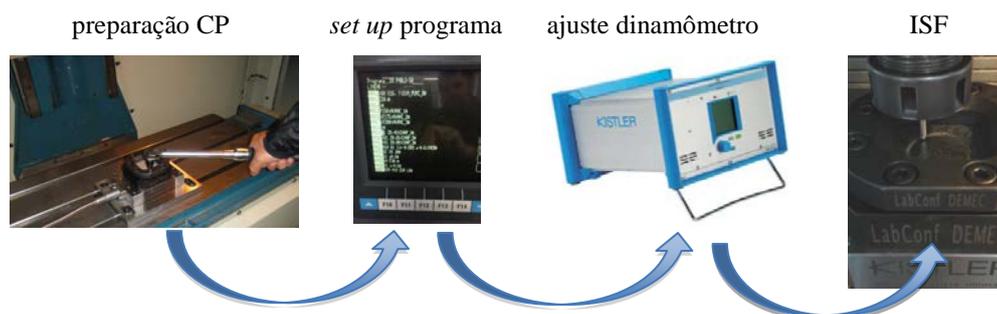
continuação

11	Desmontar o CP e marcar o número da sequência #	Alívio dos parafusos	2,0
12	Duplicar os arquivos dos dados gerados	<i>Backup</i>	0,5
13	Avaliar algum risco iminente aos sistemas envolvidos	Segurança	0,5
14	Finalizar o ciclo do teste # e encaminhar para o novo ciclo	<i>Double Check</i>	0,5
Total			30min

FONTE: O autor.

Na FIGURA 67 encontram-se as principais etapas que compõem o ciclo padrão de realização dos testes, de maneira que cada corpo de prova perpassa as respectivas fases, complementando o percurso em aproximadamente 30min, embora apenas a etapa número 8 de 1min, seja o evento almejado para a pesquisa, produzindo os dados de força F_x , F_y e F_z .

FIGURA 67 - PRINCIPAIS ETAPAS NO PROCESSO DE REALIZAÇÃO DOS TESTES.



FONTE: O autor.

Dessa forma, a cada peça ensaiada, geram-se arquivos *txt* contendo os valores brutos para os esforços nas direções x , y e z ao longo do percurso sob monitoramento para cada respectivo passe, em cada teste. Isso significa um período inicial, onde não há contato entre o punção e a chapa; um período intermediário, consistente no momento de aquisição dos esforços onde ocorre a interação punção/chapa e; por fim, um período final de aquisição, no qual a ferramenta já se encontra em repouso, sendo etapa essencial para assegurar o completo acompanhamento do fenômeno.

Foram realizados, pois, 7 passes de deformação para cada corpo de prova e, simultaneamente, em cada volta, foram arquivados os respectivos dados de força nas direções x , y e z , a uma taxa de 120Hz em até 45s. Os dados foram originalmente registrados em *Volts* e, posteriormente, convertidos em *Newton*, sendo $1V=200N$. Portanto, a partir da obtenção dos dados brutos de carga para cada passe, em cada teste, ou seja, do início do tempo de

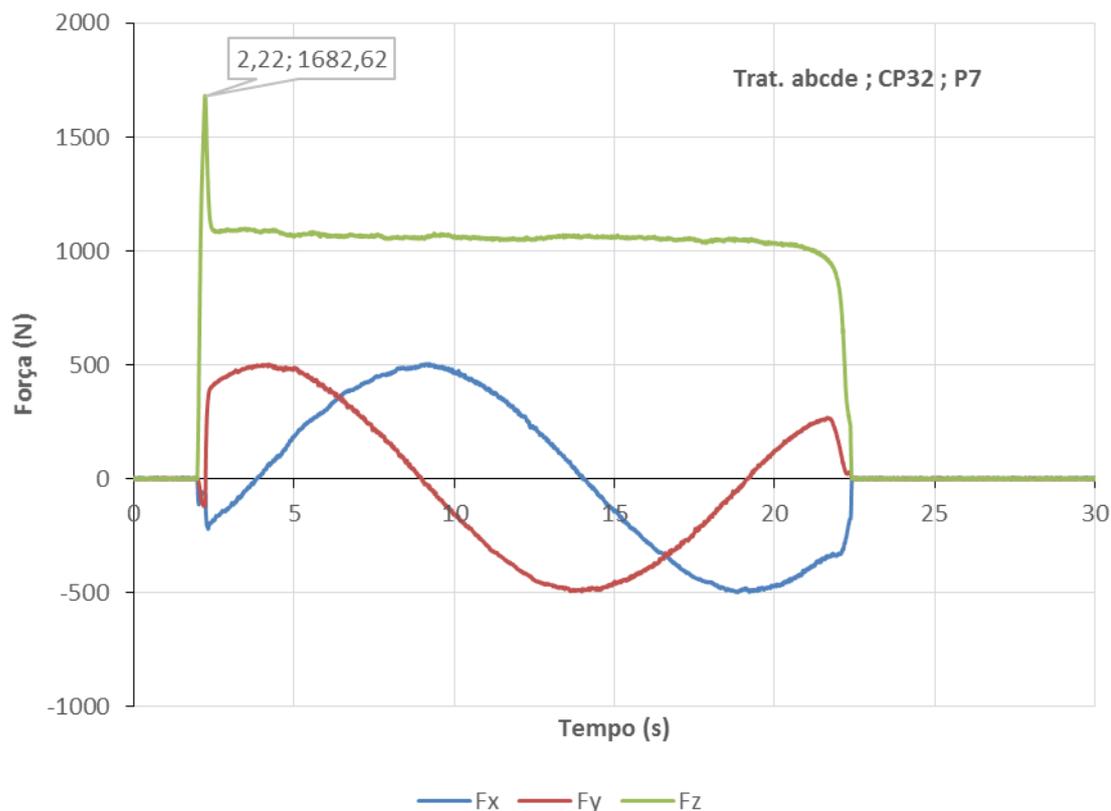
aquisição dos esforços nas direções x, y e z, até o término do tempo de aquisição para o giro completo do punção no respectivo passe tem-se, por conseguinte, o tempo total de registro dos valores do ensaio. Esse tempo total é em torno de 50% maior que o tempo efetivo de geração das forças em x, y, e z. Isto é, o processo de conformação incremental contínua está seguramente dentro do intervalo em que o sistema de aquisição de forças está atuando.

Desse modo, na FIGURA 68, observa-se o gráfico padrão gerado pelos esforços F_x , F_y e F_z ao longo de todo o período de deformação da chapa, bem como as margens de segurança no início e no final desse intervalo. Na FIGURA 68, identifica-se, ainda, a força F_{z_pico} (2,22s ; 1682,62N), ponto de maior valor para a força em z, e que coincide com a descida do punção e a deformação do fundo da peça na direção z. Nesse contexto, a primeira tarefa para organização e manipulação dos dados gerados é eliminar as regiões sem contato para tornar possível manipular apenas o intervalo em que, efetivamente, ocorre deformação mecânica da chapa sob tensão.

Pode-se também verificar – FIGURA 69 –, nitidamente, as 3 regiões que estão sendo controladas no decorrer de cada teste, sendo:

- a- região sem geração de esforços: não há contato punção/corpo de prova (sem contato)
- b- região com geração de esforços: ocorre contato punção/corpo de prova (com contato)
- c- região sem geração de esforços: não há contato punção/corpo de prova (sem contato)

FIGURA 68 - INTERVALO DE AQUISIÇÃO DOS ESFORÇOS FX, FY E FZ; CP32 , P7.

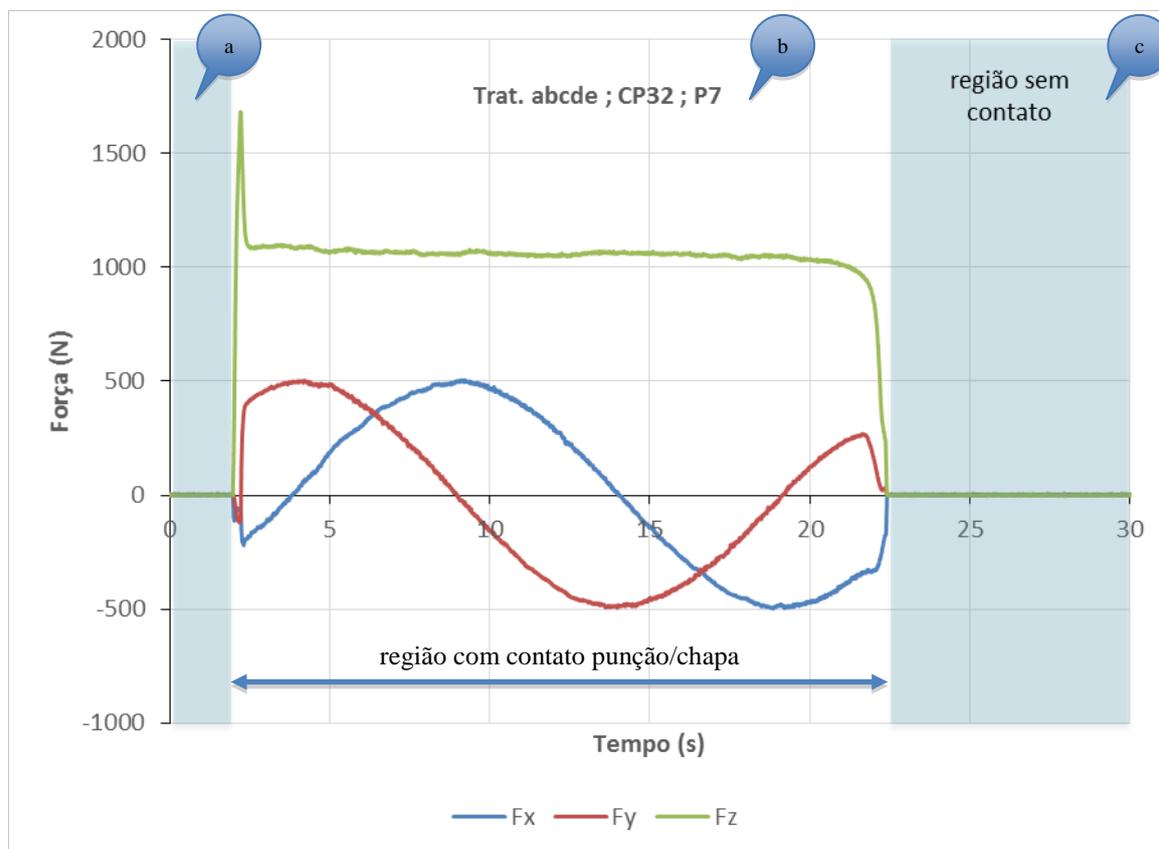


FONTE: O autor.

Com essa separação das regiões entre a parte sem contato e a com contato, é possível estabelecer o primeiro critério para o devido tratamento dos dados, qual seja: somente o intervalo com contato será alvo da investigação.

Conforme já descrito no item 4.5, o sistema de aquisição de cargas do dinamômetro Kistler gera os valores brutos na unidade $V(Volts)$ em cada instante adquiridos, utilizando-se, na sequência, um software comercial para o devido tratamento e conversão dos valores em $N(Newton)$, ou seja, a determinação das respectivas forças F_x , F_y e F_z utilizadas na pesquisa em curso. Dessa maneira, o software aplicado nesse estágio do trabalho para conversão dos dados de $Volts$ para $Newton$ é o *Excel*. Outrossim, tem-se todos os dados de cada força em $Newton$ para cada passe de cada peça ensaiada. Entretanto, é necessário estabelecer um tratamento científico para esse conjunto de dados válidos, a fim de manipulá-los estatisticamente, motivo pelo qual, no tópico a seguir, discute-se a metodologia inovadora aplicada na resolução dessa questão.

FIGURA 69 - REGIÃO ÚTIL DOS ESFORÇOS FX, FY E FZ; CP32 , P7.



FONTE: O autor.

4.9.1 Tratamento Científico dos Valores de Força

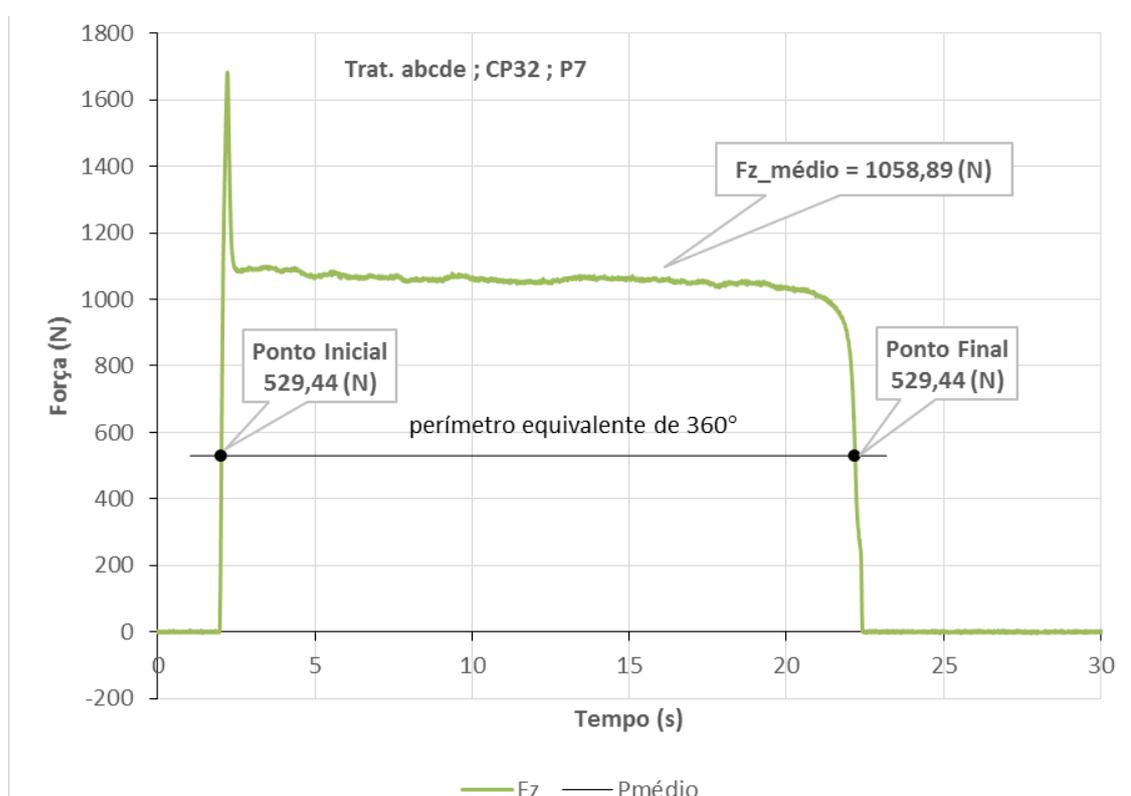
Com o objetivo de estabelecer uma metodologia simples e eficiente para o respectivo tratamento científico das forças produzidas em cada passe para cada teste no decorrer de todo o arranjo experimental, definiu-se, cautelosamente, uma estratégia para seleção do ponto inicial e do ponto final que limita a área de esforços útil à pesquisa, isto é, a área que efetivamente pode ser utilizada para o cálculo das cargas atuantes no processo que, evidentemente, está compreendida pela região com contato punção/chapa, FIGURA 69.

A determinação dos pontos inicial e final destacados no gráfico anterior decorrem do seguinte raciocínio lógico: uma vez subtraídas as regiões sem contato, FIGURA 69, tem-se, por consequência, a região com geração de esforços como região disponível para o tratamento. Todavia, com o intuito de refinar e depurar o momento de entrada e o momento de saída do punção da chapa, onde ocorrem eventuais perturbações, decidiu-se definir um

critério para estabelecer os pontos inicial e final a partir do comportamento das forças em z, Fz.

Para tanto, determina-se a média aritmética para todo o percurso da força em z, Fz – o qual está limitado à região com geração de esforços, onde existe contato punção/chapa –, sendo, nesse exemplo, o valor encontrado de $Fz_{\text{médio}}=1058,89\text{N}$. Na sequência, divide-se essa média por 2 e obtém-se o valor de $529,44\text{N}$, o qual passa a ser o valor assumido como o limite que define o ponto inicial e o ponto final da curva Fz. Assim, quando da crescente das cargas em Fz, logo que o primeiro ponto monitorado superar o valor de referência $529,44\text{N}$ nesse, imediatamente, será assumido como o ponto inicial para o monitoramento em análise. Lado outro, quando da decrescente das cargas em Fz, já no final do percurso, logo que o último ponto for menor que o valor de referência $529,44\text{N}$, esse, imediatamente, será assumido como ponto final para o monitoramento em análise. A FIGURA 70, abaixo, apresenta claramente os pontos inicial e final que definem o percurso de aquisição de Fz.

FIGURA 70 - PONTOS INICIAL E FINAL QUE DEFINEM O PERCURSO DE AQUISIÇÃO DE FZ; CP32, P7.

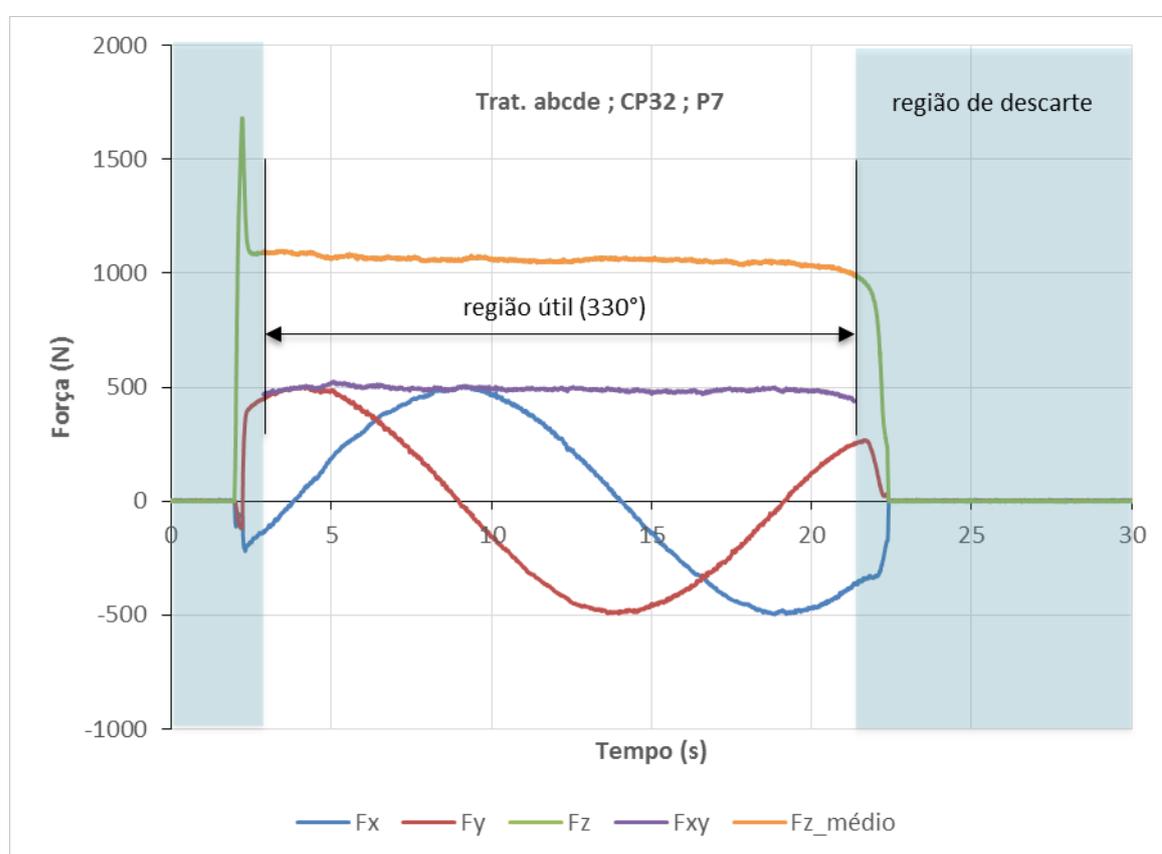


FONTE: O autor.

Com a adoção desse critério, foi possível estabelecer um padrão para determinação dos pontos inicial e final para todos os ensaios, em cada passe. Evidentemente, utilizou-se uma

função matemática no próprio ambiente *Excel* para automatizar o cálculo desses pontos a partir dos dados das forças em *Newton*, sempre com dupla verificação para evitar qualquer erro. Cabe destacar que esses mesmos limites para os pontos inicial e final na força em z, F_z , foram então extrapolados para o mesmo instante nas forças em x, F_x , e y, F_y , proporcionado, dessa forma, uma clara linha de corte inicial e final para as curvas F_x , F_y e F_z . Ressalta-se, também, que foram verificados todos os gráficos gerados para evitar quaisquer *outliers* capazes de comprometer essa estratégia inovadora.

FIGURA 71 - REGIÃO ÚTIL PARA DETERMINAÇÃO DOS ESFORÇOS MÉDIOS; CP32 , P7.



FONTE: O autor.

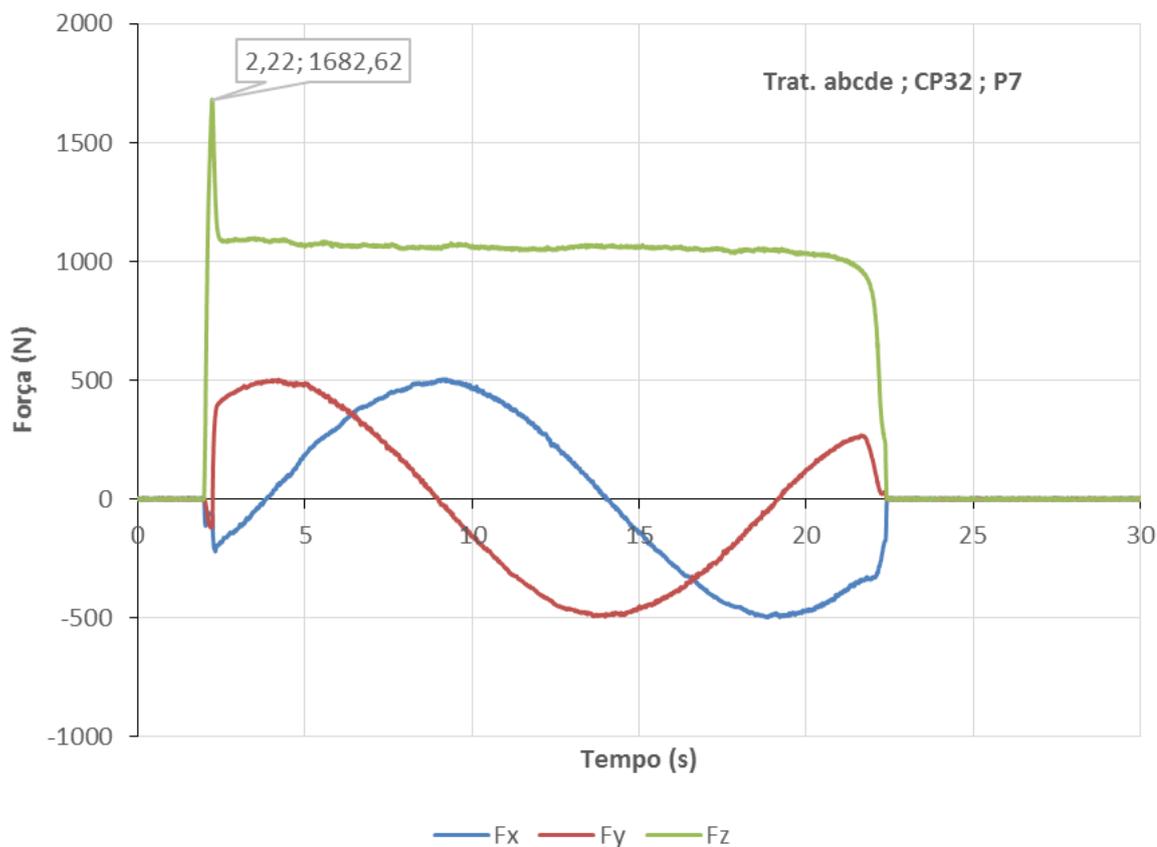
Logo, do ponto inicial ao ponto final, assumiu-se como sendo o perímetro equivalente à circunferência de 360° percorrida pelo punção ao longo do processo de conformação incremental contínua sob qualquer combinação fatorial, FIGURA 71. No entanto, no início do perímetro equivalente e no final do mesmo, encontram-se outras 2 pequenas áreas que necessitam de avaliação e ajuste. A primeira se dá em relação ao pico de entrada do punção em z que produz, sobremaneira, a força z máxima, chamada neste estudo de F_{z_pico} . Avaliando os dados gerados no ensaio preliminar e no próprio experimento principal, conclui-

se, seguramente, que o pico ocorre no instante em que o punção atinge a profundidade máxima em z e encontra-se na iminência da movimentação no plano xy . Isto posto, padronizou-se um percurso equivalente de 15° no início do processo como sendo a área que sempre contempla a carga e também identifica a respectiva magnitude da força Fz_pico para todos os ensaios. A segunda área importante surge no final do processo ISF onde, claramente, percebe-se um alívio das cargas decorrente da desaceleração do punção e da redução dos esforços inerentes ao término do processo, de modo que se definiu, também, o valor de 15° como sendo a área suficiente para “limpar” essa pequena perturbação de saída da ferramenta e, nesse sentido, por simetria na dimensão, estabelecer o critério para a barreira entre as regiões de descarte e útil, FIGURA 71. Pode-se observar na FIGURA 71 a região de descarte na entrada do processo que sempre contempla a força Fz_pico , e a região de descarte no final do processo que elimina as perturbações de saída da ferramenta, ambas com banda equivalente a 15° cada. Isto posto, a região efetivamente útil para a correta determinação das demais cargas médias, F_x , F_y e F_z , está assim demarcada.

4.9.2 Forças F_x , F_y , F_z e Fz_pico

Por sua vez, no gráfico da FIGURA 72, encontra-se o comportamento médio das forças F_x , F_y , F_z e o pico Fz_pico observados no decorrer de todo o ensaio tecnológico onde, aplicando-se os critérios descritos no tópico anterior, determina-se, com robustez, a magnitude Fz_pico como sendo o valor máximo em z . Em especial, fixa-se também os limites que definem a região útil para o cálculo das demais forças importantes para a análise da pesquisa. Essa região compreende os 330° em regime estável de deformação.

FIGURA 72 - COMPORTAMENTO MÉDIO DOS ESFORÇOS FX, FY E FZ; CP32 , P7.

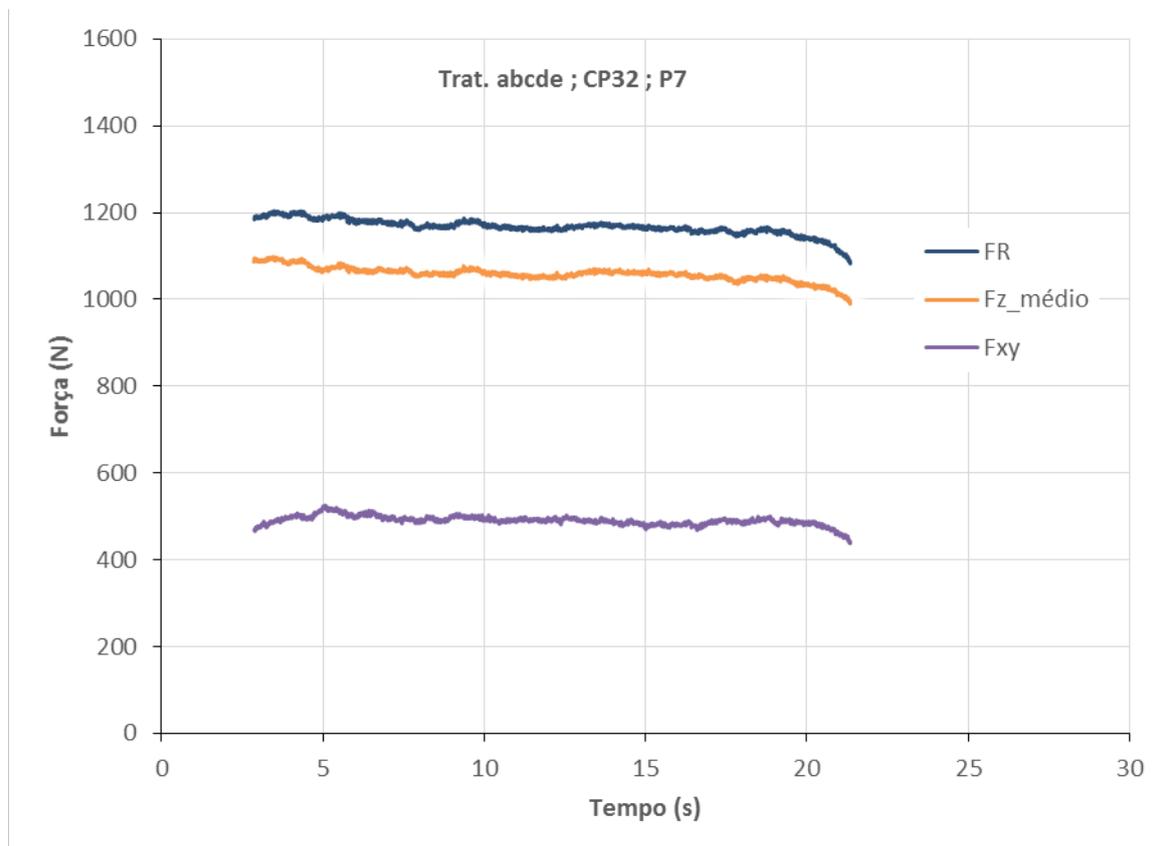


FONTE: O autor.

4.9.3 Forças Fxy, Fz_médio e FR

Já no gráfico da FIGURA 73, verificam-se os esforços Fxy, Fz_médio e FR, sendo que: Fxy é a soma vetorial dos esforços Fx e Fy, uma vez que os mesmos têm comportamento senoidal periódico; Fz_médio é o segmento da força em z dentro da região útil para análise e; FR é a soma vetorial das forças Fx, Fy e Fz, equivalente também à soma das cargas Fxy e Fz_médio. Nesse contexto, no citado gráfico, verifica-se nitidamente que a força Fxy é menor que Fz_médio e, naturalmente, que FR é a força com maior magnitude entre elas.

FIGURA 73 - REPRESENTAÇÃO DAS FORÇAS MÉDIAS FXY, FZ_MÉDIO E FR; CP32 , P7.



FONTE: O autor.

4.9.4 Tabela Padrão de Resultados Obtidos

Nesta senda, com o tratamento científico dos valores de carga Fz_{pico} , Fz_{med} , Fxy e FR em cada passe para cada peça ensaiada, conforme o arranjo experimental planejado, pode-se, finalmente, calcular e registrar os resultados obtidos em cada evento. Deste modo, na TABELA 20, encontram-se duas máscaras para a tabela padrão de resultados obtidos.

A primeira, na parte superior, com o quadro a ser preenchido pelas informações tecnológicas em processamento e, a segunda, na parte inferior, que traz os respectivos valores das variáveis respostas preenchidos. O exemplo abaixo demonstra como foram produzidos e arquivados os valores necessários para a posterior análise estatística.

TABELA 20 - EXEMPLO DE QUADRO PADRÃO PARA REGISTRO DAS VARIÁVEIS RESPOSTAS, FZ_PICO, FZ_MED, FXY E FR.

Arq.	Passe	Trat.	5	40	0,43	0,40	150	Fz_pico	Fz_med	Fxy	FR
			6	50	0,65	0,60	175				
			8	60	0,80	0,80	200				
			Diâmetro	Ângulo	Espessura	Incremento	Avanço				
			d_t	α	t	Δz	f				
			(mm)	(°)	(mm)	(mm)	(mm/min)	(N)	(N)	(N)	(N)
CP_1	1	(1)	5	40	0,43	0,40	150				
CP_1	2	(1)	5	40	0,43	0,40	150				
CP_1	3	(1)	5	40	0,43	0,40	150				
CP_1	4	(1)	5	40	0,43	0,40	150				
CP_1	5	(1)	5	40	0,43	0,40	150				
CP_1	6	(1)	5	40	0,43	0,40	150				
CP_1	7	(1)	5	40	0,43	0,40	150				

Arq.	Passe	Trat.	5	40	0,43	0,40	150	Fz_pico	Fz_med	Fxy	FR
			6	50	0,65	0,60	175				
			8	60	0,80	0,80	200				
			Diâmetro	Ângulo	Espessura	Incremento	Avanço				
			d_t	α	t	Δz	f				
			(mm)	(°)	(mm)	(mm)	(mm/min)	(N)	(N)	(N)	(N)
CP_32	1	abcde	8	60	0,80	0,80	200	537,10	405,62	100,81	417,96
CP_32	2	abcde	8	60	0,80	0,80	200	856,44	608,82	166,84	631,27
CP_32	3	abcde	8	60	0,80	0,80	200	1126,96	777,06	237,34	812,50
CP_32	4	abcde	8	60	0,80	0,80	200	1333,98	898,70	298,22	946,89
CP_32	5	abcde	8	60	0,80	0,80	200	1501,96	980,40	363,17	1045,51
CP_32	6	abcde	8	60	0,80	0,80	200	1609,38	1031,53	429,56	1117,40
CP_32	7	abcde	8	60	0,80	0,80	200	1682,62	1058,89	490,35	1166,92

FONTE: O autor.

4.10 RESUMO

Nesse capítulo foi apresentado detalhadamente todo o planejamento experimental da pesquisa, ou seja: o material que compõe o corpo de prova, a máquina-ferramenta, o projeto e fabricação do dispositivo ISF final; o sistema de aquisição de esforços; a metodologia inovadora para tratamento dos dados produzidos e; em especial, os cuidados na repetição de cada etapa do procedimento, além da calibração dos subsistemas. Assim foi que, com a condução rigorosa do planejamento e observando atentamente todas as eventuais ocorrências, realizou-se, de maneira controlada, toda a corrida experimental prevista. Agora, os resultados obtidos a partir desse experimento passarão a ser apresentados, minuciosamente, no capítulo a seguir.

5 RESULTADOS OBTIDOS

5.1 INTRODUÇÃO

Após a realização dos ensaios segundo o delineamento dos experimentos descrito no capítulo 4, e buscando organizar a apresentação das informações tecnológicas geradas nessa pesquisa, optou-se, preliminarmente, por estratificar os resultados obtidos referentes aos 5 fatores principais que estão sob investigação nos níveis baixo (-1), central (0) e alto (+1). Dessa forma, nesse item, estão descritos individualmente os dados adquiridos para cada parâmetro em cada nível do planejamento experimental – DOE – conduzido. Na TABELA 21 abaixo, encontra-se a distribuição geral dos tópicos contemplados nesse capítulo e, conseqüentemente, registram-se as principais observações e informações produzidas para cada combinação investigada do respectivo arranjo experimental no decorrer do texto.

TABELA 21 - ORGANIZAÇÃO DA APRESENTAÇÃO DOS TRATAMENTOS POR FATOR PRINCIPAL.

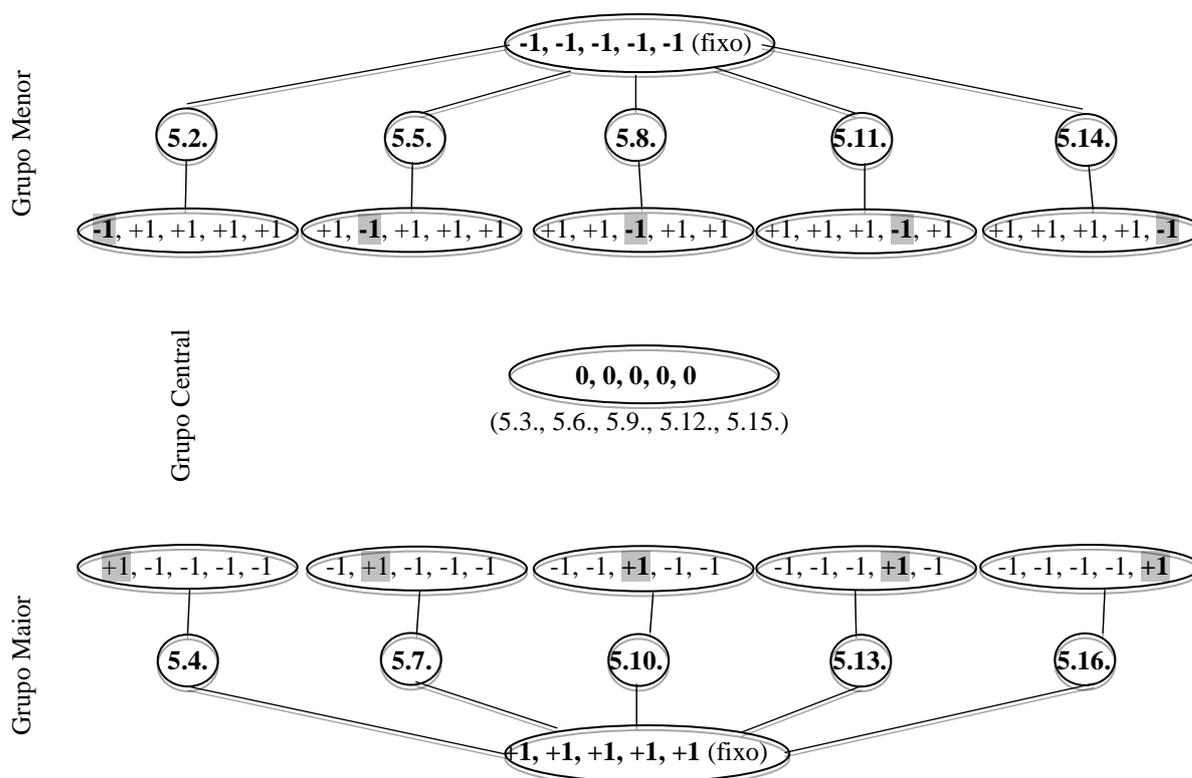
Fator Principal	Grupo Menor	Grupo Central	Grupo Maior
	nível baixo (-1)	central (0)	nível alto (+1)
[a] - Diâmetro do Punção (d_t)	5.2.	5.3.	5.4.
[b] - Ângulo de Parede (α)	5.5.	5.6.	5.7.
[c] - Espessura de Chapa (t)	5.8.	5.9.	5.10.
[d] - Incremento (Δz)	5.11.	5.12.	5.13.
[e] - Avanço (f)	5.14.	5.15.	5.16.

FONTE: O autor.

A lógica aplicada para a organização e seleção dos testes apresentados nesse capítulo obedece à seguinte ordem: inicia-se pelo tratamento no nível baixo (-1), passando pelo central (0), até o nível alto (+1), em uma sequência crescente dos fatores principais “a”, “b”, “c”, “d” e “e”. Desse modo, o item 5.2 refere-se ao grupo de menor nível (-1) e ao 1º fator principal chamado “a”, que é o diâmetro do punção d_t , ou seja, o respectivo ponto onde o diâmetro do punção é $d_t=5\text{mm}$. A seguir, no item 5.3 apresenta-se o ponto central (0), onde os níveis dos fatores principais estão ajustados para o valor intermediário do arranjo, isto é, além do diâmetro do punção em $d_t=6\text{mm}$, todos os demais fatores também estão ajustados nos seus respectivos valores intermediários (0,0,0,0,0). Por último, ainda na linha do 1º fator principal “a”, o item 5.4 que contém a análise no grupo de maior nível (+1), onde, nesse caso, o

diâmetro do punção é $d_t=8\text{mm}$ referente ao nível alto (+1). Cabe ressaltar que, para cada item, são realizadas 2 análises independentes, onde, na primeira, se fixa os demais fatores para o nível baixo (-1) e, na segunda, se fixa os demais fatores para o nível alto (+1). Na FIGURA 74, verifica-se exatamente essa distribuição entre todos os itens. Por exemplo, no item 5.2, onde o fator principal está fixado no nível baixo (-1) $d_t=5\text{mm}$, tem-se 2 análises, sendo a primeira fixando todos os demais fatores também para o nível baixo (-1), de maneira que a combinação, nesse caso, torna-se -1, -1, -1, -1, -1. Já no caso da segunda análise, os demais fatores são fixados no nível alto (+1), isto é, a combinação torna-se então em -1, +1, +1, +1, +1. Logo, a disposição completa das análises para cada fator principal está dividida em 3 conjuntos de dados que representam, cada um, o grupos menor, central e maior, observados na FIGURA 74, acumulando, assim, 3 análises para cada parâmetro e, conseqüentemente, 15 tópicos no total. Deste modo, no grupo menor, estratificam-se as análises em outros 2 subgrupos. Um primeiro subgrupo, onde todos os parâmetros principais estão ajustados para o nível baixo (-1) e está fixo, que está representado na linha superior do grupo menor na FIGURA 74 e, um segundo subgrupo, onde o parâmetro principal que está sob investigação é mantido no nível baixo (-1) – intercaladamente, e os demais fatores principais ajustados para o nível alto (+1), o qual está representado na linha inferior do grupo menor na FIGURA 74. Essa estratégia inovadora proporciona, sobremaneira, o maior contraste possível na análise individual de cada fator principal, uma vez que se pode inferir o comportamento dos extremos de cada qual, ou seja, se fixa um fator principal num determinado nível e variam-se os demais fatores; ora todos os demais para o nível baixo (-1); e ora todos os demais para o nível alto (+1). Alternando a posição do fator principal fixo e, desse modo, varrendo todos os contrastes –extremos–, figura a seguir.

FIGURA 74 - SISTEMÁTICA DE APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS POR FATOR PRINCIPAL.



FONTE: O autor.

Como outro exemplo, no grupo menor o ponto fixo está associado a todos os fatores principais ajustados ao nível baixo (-1), isto é, em -1, -1, -1, -1, -1 e o ponto que varia, alternadamente, está associado ao fator principal em análise no nível baixo (-1) e todos os demais ajustados ao nível alto (+1), iniciando-se em -1, +1, +1, +1, +1 para o item 5.2 onde somente então o diâmetro do punção d_t é mantido no nível baixo (-1) $d_t=5\text{mm}$ e os demais fatores ajustados para o nível alto (+1) e, concluindo-se em +1, +1, +1, +1, -1 para o item 5.14 onde somente então o avanço do punção f é mantido no nível baixo (-1) $f=150\text{mm/min}$ e todos os demais fatores ajustados para o nível alto (+1).

No ponto central os resultados obtidos são basicamente os mesmos para todos os fatores, ou seja, os itens, 5.3, 5.6, 5.9, 5.12 e 5.15 são investigados sob condições intermediárias no nível central 0, 0, 0, 0, 0, uma vez que o objetivo principal desse ponto é justamente testar a linearidade das curvas. Sendo assim, estão apresentados nesse capítulo os gráficos que mostram o comportamento dos esforços para cada fator principal e a conseguinte análise do modelo de regressão do fenômeno.

No grupo maior a sistemática de organização segue o mesmo raciocínio do grupo menor, todavia, nesse grupo o ponto fixo está no nível alto em +1, +1, +1, +1, +1 e o ponto que varia, intercaladamente, é simétrico ao descrito no grupo menor, ou seja, mantém-se constante o nível alto (+1) apenas para o fator sob investigação e, em seguida, todos os demais fatores ajustam-se para o nível baixo (-1), conforme FIGURA 74.

Isto posto, evidencia-se a preocupação e a parcimônia na sistemática da apresentação e seleção dos testes que estão descritos nesse capítulo. Essa metodologia inovadora busca, fundamentalmente, investigar o comportamento de cada fator – do nível baixo ao nível alto – e, por intermédio dessa varredura, revelar com nitidez os eventuais fenômenos associados a cada variável monitorada, sob todas as condições. Naturalmente essas análises tendem a complementar a análise principal DOE do modelo estatístico experimental fatorial 2^5 descrito no próximo capítulo.

5.2 EM RELAÇÃO AO DIÂMETRO DO PUNÇÃO $D_T=5\text{MM}$

Na TABELA 22 destacam-se os valores obtidos das forças; Fz_pico , Fz_med , Fxy e FR para os testes cujo o diâmetro do punção é $d_t=5\text{mm}$, ou seja, os valores compilados em *Newton* (N) para os respectivos esforços nos passes 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7, da 1ª rodada ($n=1$), das 3 repetições conduzidas.

TABELA 22 - RESULTADOS OBTIDOS DOS ESFORÇOS PARA O FATOR DIÂMETRO DO PUNÇÃO
D_T=5MM.

Arq.	Passe	Trat.	5	40	0,43	0,40	150	Fz_pico	Fz_med	Fxy	FR	
			6	50	0,65	0,60	175					
			8	60	0,80	0,80	200					
		Diâmetro	Ângulo	Espessura	Incremento	Avanço						
		d _t	α	t	Δz	f	(N)	(N)	(N)	(N)		
		(mm)	(°)	(mm)	(mm)	(mm/min)	(N)	(N)	(N)	(N)		
CP_1	1	(1)	5	40	0,43	0,40	150	30,28	15,81	4,33	16,39	
CP_1	2	(1)	5	40	0,43	0,40	150	101,56	80,08	17,75	82,02	
CP_1	3	(1)	5	40	0,43	0,40	150	167,96	135,55	35,26	140,06	
CP_1	4	(1)	5	40	0,43	0,40	150	226,56	168,09	52,19	176,01	
CP_1	5	(1)	5	40	0,43	0,40	150	253,90	190,75	60,67	200,16	
CP_1	6	(1)	5	40	0,43	0,40	150	285,16	214,50	67,65	224,91	
CP_1	7	(1)	5	40	0,43	0,40	150	308,60	236,03	76,83	248,22	
CP_3	1	b	5	60	0,43	0,40	150	32,22	17,09	3,82	17,52	
CP_3	2	b	5	60	0,43	0,40	150	104,50	79,70	17,38	81,57	
CP_3	3	b	5	60	0,43	0,40	150	181,64	133,59	34,26	137,91	
CP_3	4	b	5	60	0,43	0,40	150	236,32	170,12	46,78	176,43	
CP_3	5	b	5	60	0,43	0,40	150	270,50	196,89	54,90	204,40	
CP_3	6	b	5	60	0,43	0,40	150	303,72	218,24	68,16	228,64	
CP_3	7	b	5	60	0,43	0,40	150	333,98	234,78	81,05	248,37	
CP_5	1	c	5	40	0,80	0,40	150	267,58	221,80	45,79	226,47	
CP_5	2	c	5	40	0,80	0,40	150	415,04	328,90	99,33	343,57	
CP_5	3	c	5	40	0,80	0,40	150	507,82	401,07	143,69	426,03	
CP_5	4	c	5	40	0,80	0,40	150	624,02	478,67	195,43	517,03	
CP_5	5	c	5	40	0,80	0,40	150	707,04	542,89	229,46	589,39	
CP_5	6	c	5	40	0,80	0,40	150	765,62	590,28	263,83	646,56	
CP_5	7	c	5	40	0,80	0,40	150	829,10	640,75	298,06	706,68	
CP_7	1	bc	5	60	0,80	0,40	150	256,84	206,33	47,55	211,74	
CP_7	2	bc	5	60	0,80	0,40	150	426,76	329,95	102,44	345,49	
CP_7	3	bc	5	60	0,80	0,40	150	523,44	416,60	144,39	440,92	
CP_7	4	bc	5	60	0,80	0,40	150	659,18	510,93	200,98	549,03	
CP_7	5	bc	5	60	0,80	0,40	150	766,60	585,93	254,66	638,88	
CP_7	6	bc	5	60	0,80	0,40	150	852,54	648,02	308,27	717,61	
CP_7	7	bc	5	60	0,80	0,40	150	939,46	701,80	357,94	787,81	
CP_9	1	d	5	40	0,43	0,80	150	103,52	79,38	17,89	81,37	
CP_9	2	d	5	40	0,43	0,80	150	259,76	167,75	60,32	178,26	
CP_9	3	d	5	40	0,43	0,80	150	349,60	215,05	95,28	235,21	
CP_9	4	d	5	40	0,43	0,80	150	409,18	257,17	119,60	283,62	
CP_9	5	d	5	40	0,43	0,80	150	455,08	284,76	143,66	318,95	
CP_9	6	d	5	40	0,43	0,80	150	484,38	299,31	160,50	339,63	
CP_9	7	d	5	40	0,43	0,80	150	503,90	305,35	166,64	347,86	
CP_11	1	bd	5	60	0,43	0,80	150	84,96	68,75	14,05	70,17	
CP_11	2	bd	5	60	0,43	0,80	150	273,44	169,48	60,60	179,99	
CP_11	3	bd	5	60	0,43	0,80	150	391,60	233,93	94,56	252,32	
CP_11	4	bd	5	60	0,43	0,80	150	468,76	270,95	129,71	300,39	
CP_11	5	bd	5	60	0,43	0,80	150	523,44	295,24	164,29	337,88	
CP_11	6	bd	5	60	0,43	0,80	150	565,42	314,07	193,52	368,90	
CP_11	7	bd	5	60	0,43	0,80	150	588,86	325,50	217,08	391,24	
CP_13	1	cd	5	40	0,80	0,80	150	415,04	340,04	91,82	352,22	
CP_13	2	cd	5	40	0,80	0,80	150	683,60	527,13	185,30	558,75	
CP_13	3	cd	5	40	0,80	0,80	150	887,70	641,53	294,57	705,93	
CP_13	4	cd	5	40	0,80	0,80	150	1035,16	727,28	364,06	813,31	
CP_13	5	cd	5	40	0,80	0,80	150	1133,78	801,27	403,89	897,30	
CP_13	6	cd	5	40	0,80	0,80	150	1206,06	853,24	430,50	955,69	

Continua

Continuação

Arq.	Passe	Trat.	5	40	0,43	0,40	150				
			6	50	0,65	0,60	175				
			8	60	0,80	0,80	200				
			Diâmetro	Ângulo	Espessura	Incremento	Avanço	Fz_pico	Fz_med	Fxy	FR
			d _i	α	t	Δz	f	(N)	(N)	(N)	(N)
			(mm)	(°)	(mm)	(mm)	(mm/min)				
CP_15	1	bcd	5	60	0,80	0,80	150	434,58	342,53	91,47	354,54
CP_15	2	bcd	5	60	0,80	0,80	150	723,64	531,50	198,60	567,39
CP_15	3	bcd	5	60	0,80	0,80	150	983,40	679,81	281,05	735,61
CP_15	4	bcd	5	60	0,80	0,80	150	1169,92	789,81	351,70	864,58
CP_15	5	bcd	5	60	0,80	0,80	150				
CP_15	6	bcd	5	60	0,80	0,80	150	1375,98	888,61	468,44	1004,52
CP_15	7	bcd	5	60	0,80	0,80	150	1417,96	900,36	512,76	1036,13
CP_17	1	e	5	40	0,43	0,40	200	17,58	4,43	3,52	5,66
CP_17	2	e	5	40	0,43	0,40	200	87,90	69,44	13,23	70,69
CP_17	3	e	5	40	0,43	0,40	200	160,16	124,65	29,99	128,21
CP_17	4	e	5	40	0,43	0,40	200	213,86	154,75	43,95	160,87
CP_17	5	e	5	40	0,43	0,40	200	238,28	178,72	50,57	185,73
CP_17	6	e	5	40	0,43	0,40	200	269,54	203,90	57,88	211,96
CP_17	7	e	5	40	0,43	0,40	200	292,00	222,41	67,46	232,42
CP_19	1	be	5	60	0,43	0,40	200	15,62	3,47	3,34	4,82
CP_19	2	be	5	60	0,43	0,40	200	89,84	63,70	14,55	65,34
CP_19	3	be	5	60	0,43	0,40	200	162,10	121,49	35,88	126,68
CP_19	4	be	5	60	0,43	0,40	200	233,40	162,22	53,06	170,68
CP_19	5	be	5	60	0,43	0,40	200	264,64	192,98	65,84	203,91
CP_19	6	be	5	60	0,43	0,40	200	299,80	215,47	81,25	230,28
CP_19	7	be	5	60	0,43	0,40	200	330,08	233,72	99,76	254,12
CP_21	1	ce	5	40	0,80	0,40	200	235,36	190,21	39,75	194,32
CP_21	2	ce	5	40	0,80	0,40	200	410,16	317,74	101,88	333,67
CP_21	3	ce	5	40	0,80	0,40	200	498,04	394,65	153,92	423,60
CP_21	4	ce	5	40	0,80	0,40	200	615,24	473,41	205,44	516,06
CP_21	5	ce	5	40	0,80	0,40	200	692,38	536,01	239,89	587,24
CP_21	6	ce	5	40	0,80	0,40	200	757,82	581,84	274,68	643,42
CP_21	7	ce	5	40	0,80	0,40	200	821,28	630,81	307,97	701,97
CP_23	1	bce	5	60	0,80	0,40	200	279,30	211,04	45,19	215,82
CP_23	2	bce	5	60	0,80	0,40	200				
CP_23	3	bce	5	60	0,80	0,40	200	543,94	428,55	174,07	462,55
CP_23	4	bce	5	60	0,80	0,40	200	681,64	515,16	241,73	569,05
CP_23	5	bce	5	60	0,80	0,40	200	774,42	587,30	298,36	658,75
CP_23	6	bce	5	60	0,80	0,40	200	861,32	653,71	344,66	739,01
CP_23	7	bce	5	60	0,80	0,40	200	952,14	706,64	387,60	805,96
CP_25	1	de	5	40	0,43	0,80	200	95,70	78,09	19,22	80,42
CP_25	2	de	5	40	0,43	0,80	200	261,72	168,24	66,45	180,89
CP_25	3	de	5	40	0,43	0,80	200	350,58	215,38	103,24	238,84
CP_25	4	de	5	40	0,43	0,80	200	412,10	255,21	134,10	288,30
CP_25	5	de	5	40	0,43	0,80	200	461,92	282,21	162,30	325,55
CP_25	6	de	5	40	0,43	0,80	200	493,16	133,16	82,86	156,84
CP_25	7	de	5	40	0,43	0,80	200	370,12	164,64	190,54	251,82
CP_27	1	bde	5	60	0,43	0,80	200	103,52	73,95	15,75	75,61
CP_27	2	bde	5	60	0,43	0,80	200	288,08	176,09	65,63	187,93
CP_27	3	bde	5	60	0,43	0,80	200	404,30	238,52	98,74	258,15
CP_27	4	bde	5	60	0,43	0,80	200	472,66	274,51	132,77	304,93
CP_27	5	bde	5	60	0,43	0,80	200	531,26	298,37	164,96	340,94
CP_27	6	bde	5	60	0,43	0,80	200	571,28	316,63	190,88	369,72
CP_27	7	bde	5	60	0,43	0,80	200	593,76	327,61	208,92	388,56

Continua

Continuação

Arq.	Passe	Trat.	5	40	0,43	0,40	150	Fz_pico	Fz_med	Fxy	FR
			6	50	0,65	0,60	175				
			8	60	0,80	0,80	200				
			Diâmetro	Ângulo	Espessura	Incremento	Avanço				
			d_f	α	t	Δz	f				
			(mm)	(°)	(mm)	(mm)	(mm/min)	(N)	(N)	(N)	(N)
CP_29	1	cde	5	40	0,80	0,80	200	416,02	328,65	86,63	339,87
CP_29	2	cde	5	40	0,80	0,80	200	670,90	513,45	178,09	543,45
CP_29	3	cde	5	40	0,80	0,80	200	869,14	630,13	287,27	692,52
CP_29	4	cde	5	40	0,80	0,80	200	1019,54	717,59	361,24	803,38
CP_29	5	cde	5	40	0,80	0,80	200	1128,90	792,35	402,28	888,62
CP_29	6	cde	5	40	0,80	0,80	200	1193,36	846,50	434,71	951,60
CP_29	7	cde	5	40	0,80	0,80	200				
CP_31	1	bcde	5	60	0,80	0,80	200	472,66	358,68	98,08	371,85
CP_31	2	bcde	5	60	0,80	0,80	200	744,14	543,02	204,13	580,12
CP_31	3	bcde	5	60	0,80	0,80	200	990,24	689,86	288,59	747,79
CP_31	4	bcde	5	60	0,80	0,80	200	1181,64	801,06	361,17	878,72
CP_31	5	bcde	5	60	0,80	0,80	200	1305,66	866,73	422,91	964,40
CP_31	6	bcde	5	60	0,80	0,80	200	1383,78	899,98	479,94	1019,96
CP_31	7	bcde	5	60	0,80	0,80	200	1435,54	910,47	525,51	1051,25

FONTE: O autor.

No APÊNDICE B encontram-se todos os demais valores obtidos para as demais repetições programadas para o planejamento experimental completo. Conforme TABELA 16, foram realizadas 3 repetições para cada tratamento do planejamento fatorial 2^5 , ou seja, foram 32 combinações, repetidas 3 vezes e, adicionalmente, mais 10 testes no ponto central. Desse modo, o total de ensaios realizados foi de 106 testes, com 7 passes em z monitorados para cada corpo de prova avaliado.

Apesar dos cuidados e da segurança no processo de realização e aquisição dos dados ao longo do experimento e, em especial, na redundância da verificação dos parâmetros de controle do sistema de aquisição de cargas e da máquina-ferramenta ocorreram, pontualmente, algumas poucas falhas na aquisição e/ou registro dos valores. Na tabela anterior percebem-se 3 falhas:

- Corpo de prova 15, passe 5 (CP15 ; P5)
- Corpo de prova 23, passe 2 (CP23 ; P2)
- Corpo de prova 29, passe 7 (CP29 ; P7)

Essas falhas não comprometem o resultado final pois as demais repetições proporcionam a determinação da média pontual para cada esforço, sem prejuízos significativos. Entretanto, no intuito de viabilizar o preenchimento da tabela final dos dados

estatísticos para a posterior análise do planejamento fatorial 2^5 optou-se, por conseguinte, atribuir ao dado faltante o valor da média das 2 repetições complementares. Logo, o valor atribuído ao dado faltante (CP15 ; P5) é a média entre os dados das repetições (CP47 ; P5) e (CP79 ; P5). Essa mesma lógica de correção foi aplicada a todas as eventuais falhas de aquisição e/ou registro dos valores de carga.

Na TABELA 23 estão organizadas também as médias dos esforços para o tratamento (1), a partir das 3 repetições; CP1, CP33 e CP65. Essa combinação (1) ocorre quando todos os fatores estão ajustados nos níveis -1,-1,-1,-1,-1 e refere-se à primeira análise desse item 5.2. A segunda análise está descrita na página 115 – níveis -1,+1,+1,+1,+1 –, ou seja, em cada item tem-se 2 análises conforme justificado no tópico 5.1.

TABELA 23 - MÉDIAS DOS ESFORÇOS FZ_PICO, FR, FZ_MÉDIO E FXY PARA AS 3 REPETIÇÕES NO TRATAMENTO (1).

Passe	Corpo de Prova			Média
	1	33	65	
	Fz_pico			
1	30,28	27,34	31,26	29,63
2	101,56	90,82	97,66	96,68
3	167,96	160,16	164,06	164,06
4	226,56	211,92		219,24
5	253,90	235,36	242,18	243,81
6	285,16	261,72	270,50	272,46
7	308,60	289,06	290,04	295,90

Passe	Corpo de Prova			Média
	1	33	65	
	FR			
1	16,39	16,33	17,40	16,71
2	82,02	76,04	77,54	78,53
3	140,06	129,26	130,56	133,29
4	176,01	160,51		168,26
5	200,16	185,45	184,38	190,00
6	224,91	210,17	208,24	214,44
7	248,22	231,70	229,10	236,34

Passe	Corpo de Prova			Média
	1	33	65	
	Fz_médio			
1	15,81	15,47	16,32	15,86
2	80,08	73,85	75,64	76,52
3	135,55	124,18	126,25	128,66
4	168,09	151,10	0,00	106,40
5	190,75	173,70	175,66	180,04
6	214,50	197,74	198,54	203,59
7	236,03	217,08	217,58	223,56

Passe	Corpo de Prova			Média
	1	33	65	
	Fxy			
1	4,33	5,25	6,03	5,20
2	17,75	18,09	17,06	17,63
3	35,26	35,88	33,27	34,80
4	52,19	54,14		53,16
5	60,67	64,94	56,03	60,55
6	67,65	71,20	62,82	67,22
7	76,83	80,99	71,73	76,52

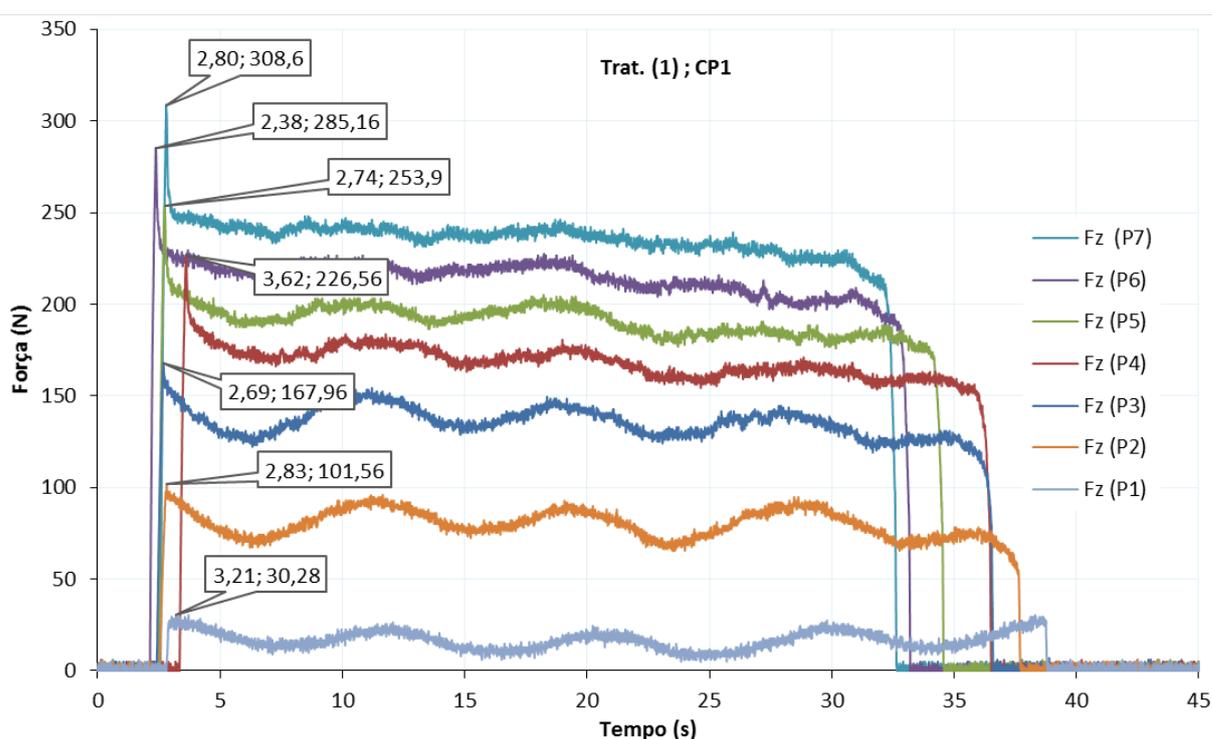
FONTE: O autor.

No quadro superior esquerdo da TABELA 23 apresentam-se as médias dos esforços em Fz_pico em cada passe incremental para as 3 repetições conduzidas nessa combinação onde todos os fatores estão ajustados no nível baixo (-1), isto é, tratamento -1, -1, -1, -1, -1. Ademais, os valores de Fz_pico para o corpo de prova CP1 estão destacados na FIGURA 75 evidenciando a evolução do comportamento dos esforços em z para cada passe, bem como o dado do maior valor da força em z, a chamada força Fz_pico. A força Fz_pico ocorre no

momento de avanço axial do punção e está discutida no item 6.7, contudo, cabe ressaltar, que esses são os maiores esforços monitorados ao longo do experimento e, dessa maneira, são fundamentais para as avaliações e ponderações no decorrer da investigação científica.

No quadro superior direito da TABELA 23 apresentam-se as médias dos esforços em FR que são ligeiramente menores que as médias Fz_pico , embora a força resultante FR seja uma carga contínua ao longo do processo de conformação incremental da peça enquanto a Fz_pico seja um carregamento apenas inicial e, unicamente, na direção z e no sentido (-). Os demais quadros apresentam os esforços em $Fz_médio$ e Fxy que não foram utilizados para as análises estatísticas uma vez que seus valores médios estão abaixo das médias Fz_pico e FR, ou seja, somente as maiores médias foram utilizadas, pois são as que efetivamente podem acarretar danos à peça, ao punção ou à integridade do fuso da máquina-ferramenta CNC.

FIGURA 75 - COMPORTAMENTO DOS ESFORÇOS EM FZ NOS 7 PASSES PARA O TRATAMENTO (1), CPI.



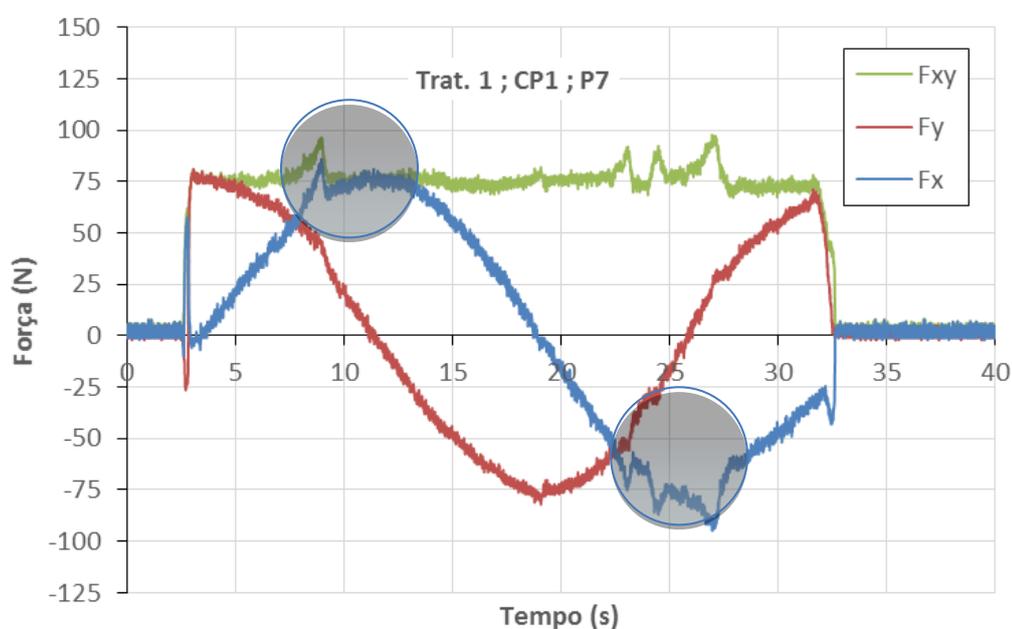
FONTE: O autor.

Na FIGURA 76 registra-se também o comportamento das forças Fx e Fy ao longo do processo e a respectiva soma vetorial Fxy . Sendo que, Fx e Fy apresentam comportamento senoidal simétrico, uma vez que a trajetória do punção é circular, partindo do ponto $(x,0)$ e avançando no sentido horário. Estão apontadas duas áreas com vibrações que foram captadas

pelo monitoramento dos esforços e, muito provavelmente, em decorrência da dinâmica de alteração da direção de sentido do punção no plano xy e eventual acúmulo de partículas na região de contato entre punção/peça. Aspecto importante aqui é que, nitidamente, a oscilação ocorre, preponderantemente, no eixo x, o que induz também uma eventual análise das folgas no eixo de deslocamento da mesa em x.

Na TABELA 24 destacam-se os pontos de mínimo e máximo das cargas F_x e F_y , onde a soma vetorial F_{xy} tende a permanecer constante ao longo do percurso. Na FIGURA 28 pode-se observar a representação do percurso realizado pelo punção.

FIGURA 76 - COMPORTAMENTO DOS ESFORÇOS EM F_x , F_y E F_{xy} NO PASSE 7 PARA O TRATAMENTO (1), CP1.



FONTE: O autor.

As oscilações percebidas no gráfico acima, na força F_x em torno do tempo $t=9s$ e nas vizinhanças do tempo $t=25s$, são perturbações possivelmente decorrentes do empastamento do material da chapa a jusante do punção, ou seja, hipótese relacionada à tribologia de contato punção/chapa. Esse fenômeno surge em condições onde os esforços estão em patamares relativamente baixos, ou seja, cargas inferiores a 300N, talvez favorecendo a aderência do material da chapa à superfície da ferramenta.

TABELA 24 - POSIÇÃO DOS ESFORÇOS MÍNIMOS E MÁXIMOS EM X E Y AO LONGO DO MOVIMENTO CIRCULAR HORÁRIO DO PUNÇÃO.

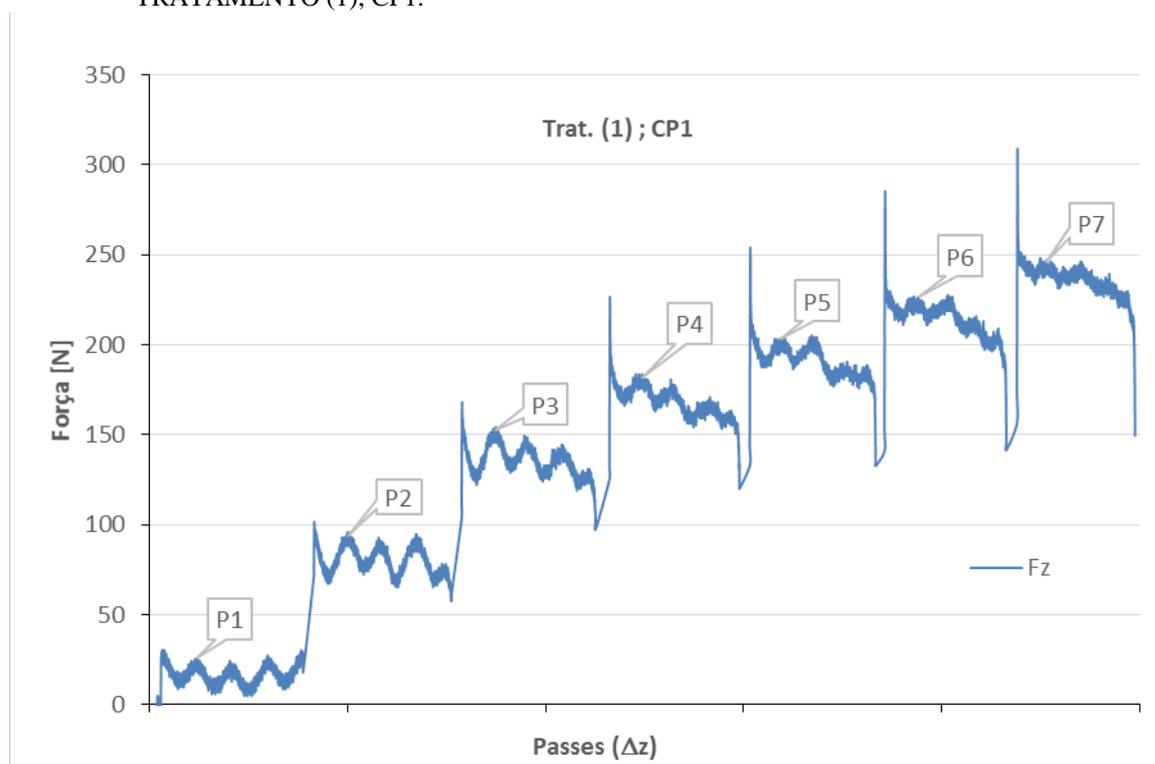
Volta	Posição em X	Posição em Y
Início	Fx_máx	0
1/4	0	Fy_mín
1/2	Fx_mín	0
3/4	0	Fy_máx
Término	Fx_máx	0

FONTE: O autor.

Na FIGURA 77 verificam-se com clareza os patamares escalonados das cargas presentes ao longo de todo o experimento, ou seja, a evolução da força F_z desde o 1º passe até o 7º e último passe. Nesse gráfico é possível observar que a forma da curva tende a estabilizar a partir do 3º passe, isto é, os 2 primeiros passes apresentam cargas pequenas e oscilações significativas no comportamento das respectivas curvas.

Entretanto, como os esforços são pequenos nos 2 primeiros passes, pode-se descartar a análise estatística uma vez que esses pontos concentram significativa perturbação mas não comprometem a qualidade da peça e nem a integridade da máquina-ferramenta.

FIGURA 77 - COMPORTAMENTO DO ESFORÇO F_z AO LONGO DE 7 PASSES PARA O TRATAMENTO (1), CP1.



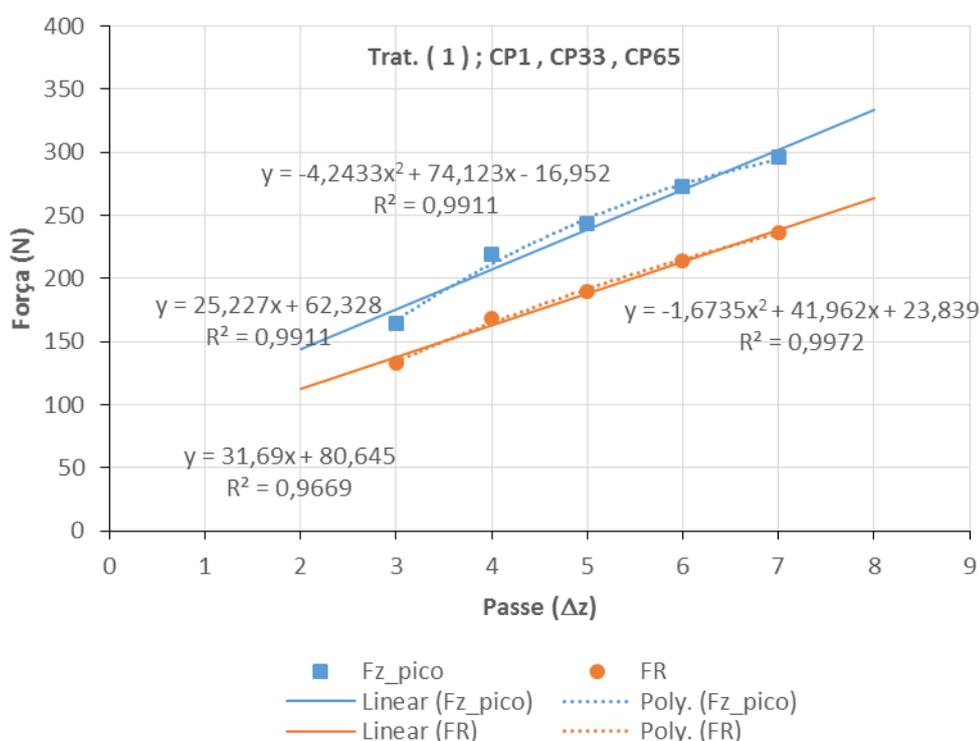
FONTE: O autor.

A análise de regressão do modelo de forma simples, ou seja, considerando apenas a variação no incremento Δz dos passes de 3 a 7 para a condição em estudo pode ser observada no gráfico da FIGURA 78. Conforme justificado no parágrafo anterior, os passes 1 e 2 são desconsiderados por acarretarem intensa perturbação ao modelo matemático calculado mas não comprometerem a qualidade do processo e nem a integridade da máquina-ferramenta, embora sejam monitorados e computados nos dados obtidos.

Portanto, estão apresentadas as regressões linear e polinomial de 2ª ordem, onde, constata-se também o coeficiente de determinação R^2 para cada equação respectivamente. Sendo que a qualidade do ajuste do modelo tende a explicar melhor o fenômeno na regressão de 2ª ordem. Todavia, assumi-se que para $R^2 > 0,9$ a qualidade da resposta é aceitável e pode então ser levada em consideração nas análises vindouras.

Sendo assim, apresenta-se apenas a análise de regressão dos esforços Fz_pico e FR pois são as maiores cargas atuantes no processo de conformação incremental, logo, as mais críticas sob todos os aspectos.

FIGURA 78 - ANÁLISE DE REGRESSÃO DO MODELO PARA O TRAT. (1) NAS 3 REPETIÇÕES; CP1, CP33 E CP65.



FONTE: O autor.

Perseguindo a estratégia estabelecida para a adequada exposição dos resultados obtidos, tem-se, a partir desse instante, os dados produzidos pela combinação “bcde”.

Na TABELA 25 estão organizadas as médias dos esforços para o tratamento “bcde”, a partir das 3 repetições; CP31, CP63 e CP95. Essa combinação ocorre quando o fator principal diâmetro do punção d_t está no nível baixo (-1), $d_t=5\text{mm}$, e os demais estão ajustados nos níveis altos (+1), ou seja, a combinação “bcde” = -1,+1,+1,+1,+1. Conforme discutido no item 5.1 esse segundo ponto de análise é importante pois proporciona o maior contraste à avaliação do fenômeno em questão.

TABELA 25 - MÉDIAS DOS ESFORÇOS FZ_PICO, FR, FZ_MÉDIO E FXY PARA AS 3 REPETIÇÕES NO TRATAMENTO “BCDE”.

Passe	Corpo de Prova			Média
	31	63	95	
	Fz_pico			
1	472,66	456,06	445,32	458,01
2	744,14	727,54	736,32	736,00
3	990,24	969,72	976,56	978,84
4	1181,64	1162,10	1163,08	1168,94
5	1305,66	1300,78	1287,10	1297,85
6	1383,78	1378,90	1370,12	1377,60
7	1435,54	1423,82	1417,96	1425,77

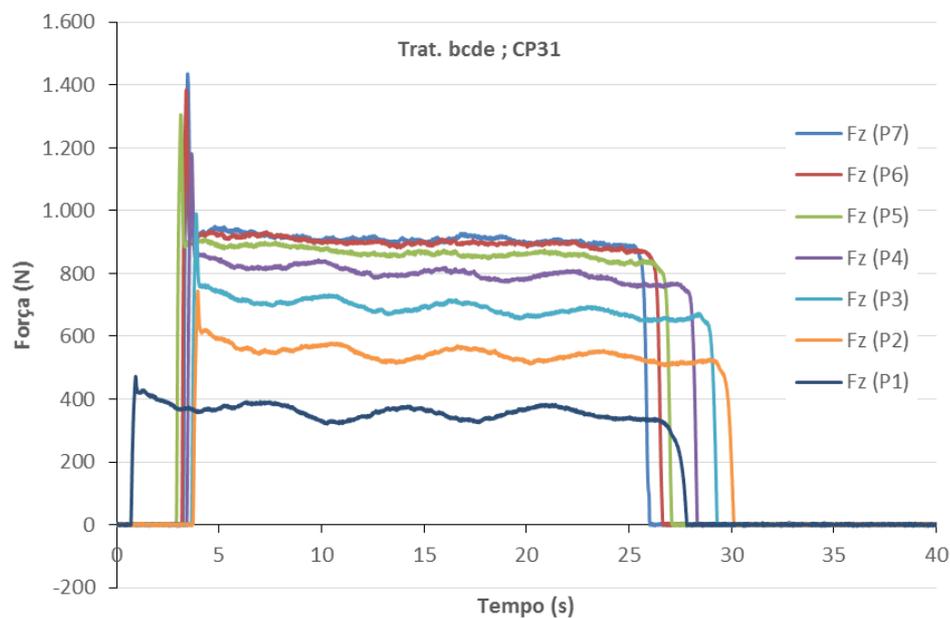
Passe	Corpo de Prova			Média
	31	63	95	
	FR			
1	371,85	360,31	356,57	362,91
2	580,12	577,28	573,54	576,98
3	747,79	747,50	743,51	746,27
4	878,72	879,16	874,35	877,41
5	964,40	966,02	961,47	963,96
6	1019,96	1023,01	1019,13	1020,70
7	1051,25	1052,01	1049,12	1050,79

Passe	Corpo de Prova			Média
	31	63	95	
	Fz_médio			
1	358,68	347,98	342,77	349,81
2	543,02	540,24	534,33	539,20
3	689,86	686,27	678,69	684,94
4	801,06	795,68	789,48	795,41
5	866,73	862,86	857,79	862,46
6	899,98	898,92	890,47	896,46
7	910,47	906,82	899,23	905,51

Passe	Corpo de Prova			Média
	31	63	95	
	Fxy			
1	98,08	93,47	98,22	96,59
2	204,13	203,45	208,41	205,33
3	288,59	296,30	303,64	296,18
4	361,17	373,92	375,78	370,29
5	422,91	434,36	434,29	430,52
6	479,94	488,36	495,67	487,99
7	525,51	533,28	540,40	533,07

FONTE: O autor.

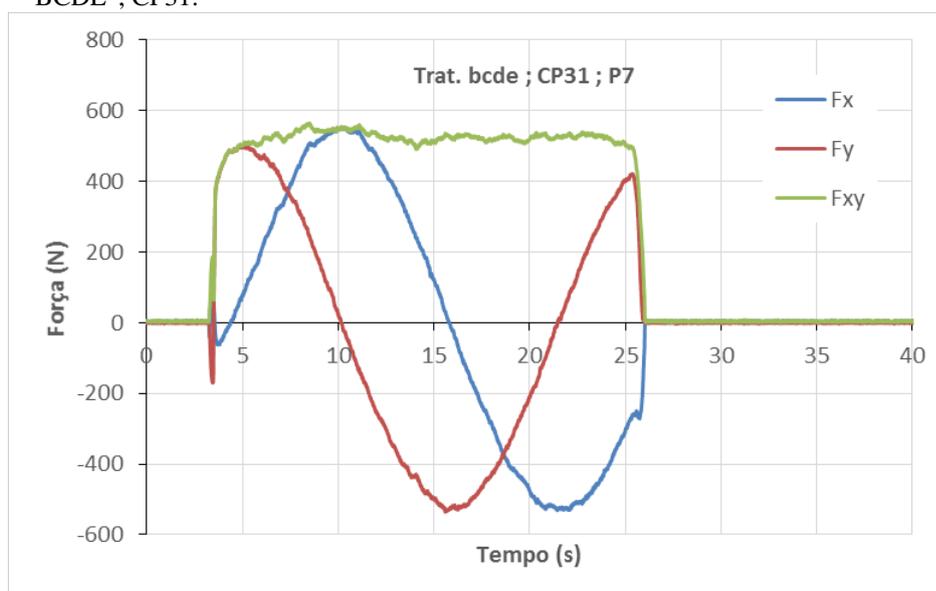
FIGURA 79 - COMPORTAMENTO DOS ESFORÇOS EM FZ NOS 7 PASSES PARA O TRAT. "BCDE", CP31.



FONTE: O autor.

No gráfico acima encontram-se as curvas referentes ao comportamento do esforço em z para os 7 passes conduzidos no tratamento, bem como o destaque para o ponto Fz_pico. Novamente caracteriza-se uma tendência de estabilidade na forma da curva a partir do 3º passe.

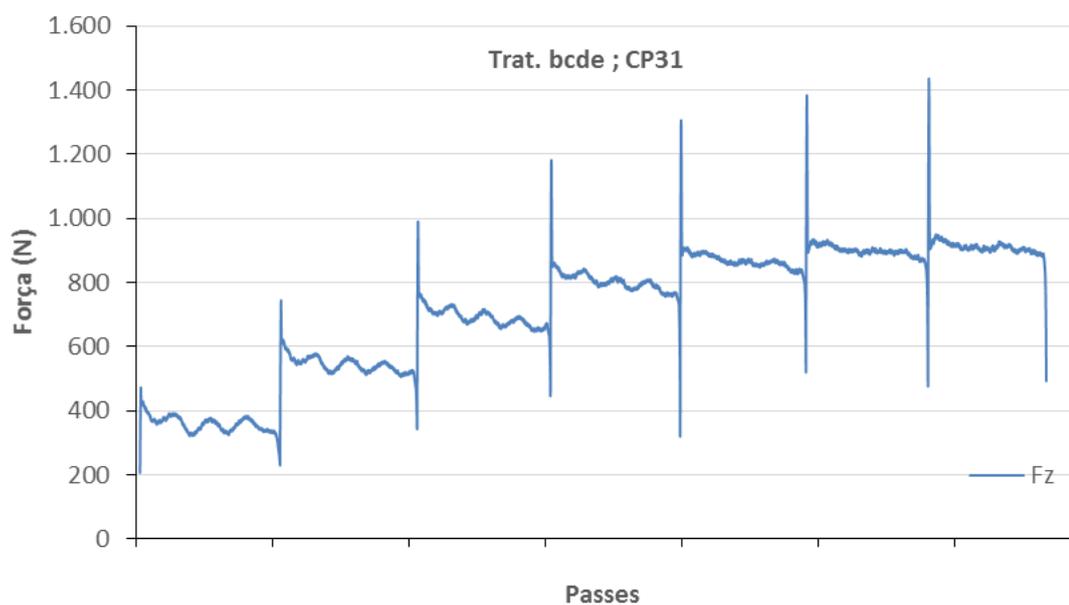
FIGURA 80 - COMPORTAMENTO DOS ESFORÇOS EM FX, FY E FXY NO PASSE 7 PARA O TRAT. "BCDE", CP31.



FONTE: O autor.

No gráfico da FIGURA 80 verificam-se as curvas F_x , F_y e F_{xy} que evidenciam o comportamento quase estável dos esforços no plano xy ao longo da trajetória circular realizada pelo punção. Registra-se que nesse caso onde os esforços são superiores a 300N não surgem evidências de trepidação no eixo x ou em qualquer outro eixo.

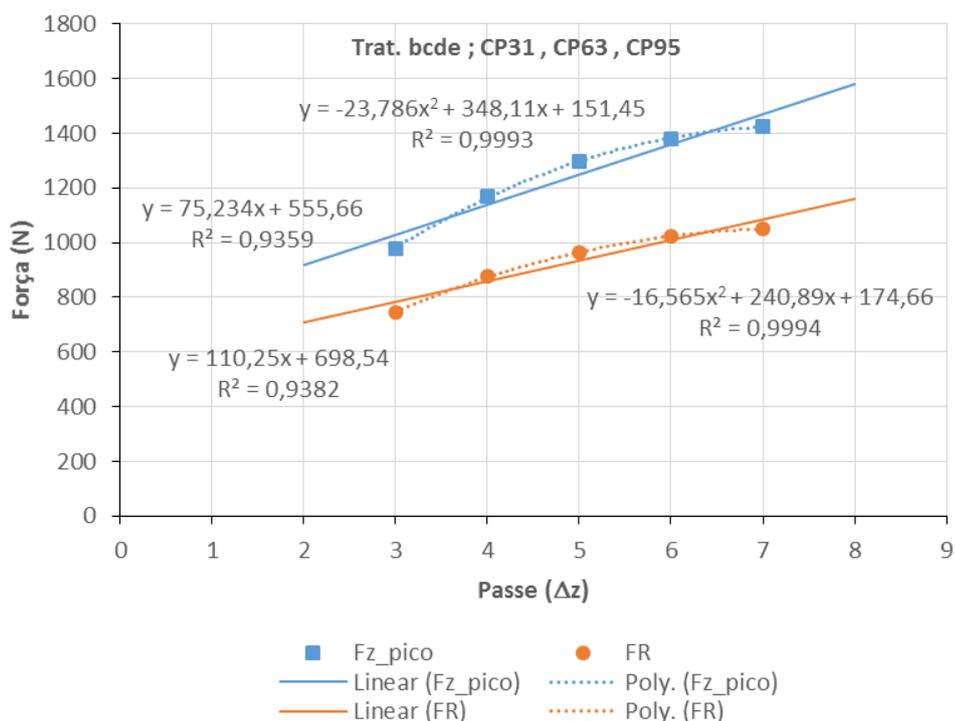
FIGURA 81 - COMPORTAMENTO DO ESFORÇO FZ AO LONGO DE 7 PASSES PARA O TRAT. "BCDE", CP31.



FONTE: O autor.

No gráfico da FIGURA 81 observam-se os patamares escalonados das curvas dos esforços em z ao longo de todo o teste e os seus respectivos picos de carga que são as forças F_{z_pico} em cada passe. Evidenciando que o comportamento das curvas tende a se estabilizar em patamares maiores.

FIGURA 82 - ANÁLISE DE REGRESSÃO PARA O TRAT. "BCDE" NAS 3 REPETIÇÕES; CP31, CP63 E CP95.



FONTE: O autor.

A análise de regressão do modelo de forma simples, ou seja, considerando apenas a variação no incremento Δz dos passes de 3 a 7 pode ser observada no gráfico anterior.

5.3 EM RELAÇÃO AO DIÂMETRO DO PUNÇÃO $D_T=6\text{MM}$

Na TABELA 26 destacam-se os valores obtidos das forças; Fz_pico , Fz_med , Fxy e FR para os testes cujo o diâmetro do punção é $d_t=6\text{mm}$, ou seja, os valores ajustados em *Newton* (N) para os respectivos esforços nos passes 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7. Esse é o ponto central do planejamento fatorial que tem como objetivo fundamental testar a linearidade das variáveis dependentes. Foram 10 repetições, do corpo de prova CP97 ao corpo de prova CP106. Isto é, a combinação testada em todos os ensaios é a central = 0, 0, 0, 0, 0 e todos os demais fatores fixos no ajuste intermediário. No corpo de prova CP99 passe 7 ocorreu uma falha na aquisição dos dados, entretanto, não se compromete a análise uma vez que as demais repetições suprem essa pequena falta.

TABELA 26 - RESULTADOS OBTIDOS DOS ESFORÇOS PARA O FATOR DIÂMETRO DO PUNÇÃO
D_T=6MM.

Arq.	Passe	Trat.	5	40	0,43	0,40	150	Fz_pico (N)	Fz_med (N)	Fxy (N)	FR (N)
			6	50	0,65	0,60	175				
			8	60	0,80	0,80	200				
			Diâmetro	Ângulo	Espessura	Incremento	Avanço				
			d _t (mm)	α (°)	t (mm)	Δz (mm)	f (mm/min)				
CP_97	1	central	6	50	0,65	0,60	175	265,62	202,48	45,64	207,56
CP_97	2	central	6	50	0,65	0,60	175	421,88	309,19	84,93	320,64
CP_97	3	central	6	50	0,65	0,60	175	549,80	391,13	119,64	409,02
CP_97	4	central	6	50	0,65	0,60	175	654,30	463,39	144,78	485,48
CP_97	5	central	6	50	0,65	0,60	175	734,38	517,04	171,36	544,70
CP_97	6	central	6	50	0,65	0,60	175	806,64	557,32	200,04	592,13
CP_97	7	central	6	50	0,65	0,60	175	853,52	585,36	227,52	628,03
CP_98	1	central	6	50	0,65	0,60	175	271,48	212,71	49,07	218,29
CP_98	2	central	6	50	0,65	0,60	175	435,54	315,78	84,68	326,93
CP_98	3	central	6	50	0,65	0,60	175	568,36	399,35	119,10	416,73
CP_98	4	central	6	50	0,65	0,60	175	670,90	468,66	142,17	489,75
CP_98	5	central	6	50	0,65	0,60	175	748,04	520,56	168,24	547,07
CP_98	6	central	6	50	0,65	0,60	175	813,48	559,84	195,35	592,95
CP_98	7	central	6	50	0,65	0,60	175	856,44	587,75	223,22	628,71
CP_99	1	central	6	50	0,65	0,60	175	261,72	204,57	46,02	209,69
CP_99	2	central	6	50	0,65	0,60	175	414,06	313,81	86,38	325,48
CP_99	3	central	6	50	0,65	0,60	175	551,76	396,43	121,51	414,64
CP_99	4	central	6	50	0,65	0,60	175	657,22	468,35	146,48	490,72
CP_99	5	central	6	50	0,65	0,60	175	743,16	522,13	175,15	550,72
CP_99	6	central	6	50	0,65	0,60	175	808,60	561,11	205,50	597,56
CP_99	7	central	6	50	0,65	0,60	175				
CP_100	1	central	6	50	0,65	0,60	175	269,54	231,46	51,25	237,06
CP_100	2	central	6	50	0,65	0,60	175	486,32	354,18	97,80	367,44
CP_100	3	central	6	50	0,65	0,60	175	621,10	443,62	134,08	463,44
CP_100	4	central	6	50	0,65	0,60	175	729,50	518,61	160,85	542,98
CP_100	5	central	6	50	0,65	0,60	175	815,42	574,60	190,71	605,42
CP_100	6	central	6	50	0,65	0,60	175	882,82	615,31	224,61	655,02
CP_100	7	central	6	50	0,65	0,60	175	931,64	643,65	261,45	694,72
CP_101	1	central	6	50	0,65	0,60	175	248,04	196,38	44,17	201,28
CP_101	2	central	6	50	0,65	0,60	175	430,66	315,87	94,31	329,65
CP_101	3	central	6	50	0,65	0,60	175	569,34	402,57	135,97	424,91
CP_101	4	central	6	50	0,65	0,60	175	673,82	475,21	175,38	506,54
CP_101	5	central	6	50	0,65	0,60	175	753,90	528,65	219,65	572,47
CP_101	6	central	6	50	0,65	0,60	175	829,10	568,88	268,87	629,22
CP_101	7	central	6	50	0,65	0,60	175	891,60	596,62	314,56	674,46
CP_102	1	central	6	50	0,65	0,60	175	305,66	233,70	52,08	239,44
CP_102	2	central	6	50	0,65	0,60	175	499,02	357,19	99,94	370,91
CP_102	3	central	6	50	0,65	0,60	175	630,86	445,94	138,18	466,86
CP_102	4	central	6	50	0,65	0,60	175	733,40	520,80	164,06	546,03
CP_102	5	central	6	50	0,65	0,60	175	818,36	573,17	192,74	604,70
CP_102	6	central	6	50	0,65	0,60	175	879,88	610,63	221,98	649,73
CP_102	7	central	6	50	0,65	0,60	175	930,66	638,17	249,38	685,16
CP_103	1	central	6	50	0,65	0,60	175	248,04	197,82	41,44	202,11
CP_103	2	central	6	50	0,65	0,60	175	422,86	317,35	89,03	329,61
CP_103	3	central	6	50	0,65	0,60	175	550,78	401,00	125,48	420,17
CP_103	4	central	6	50	0,65	0,60	175	656,26	476,46	149,53	499,37
CP_103	5	central	6	50	0,65	0,60	175	748,04	531,21	176,30	559,70
CP_103	6	central	6	50	0,65	0,60	175	820,32	569,06	206,27	605,29
CP_103	7	central	6	50	0,65	0,60	175	867,18	596,67	235,79	641,57
CP_104	1	central	6	50	0,65	0,60	175	262,70	201,92	43,74	206,60
CP_104	2	central	6	50	0,65	0,60	175	426,76	315,65	87,84	327,65
CP_104	3	central	6	50	0,65	0,60	175	559,58	397,58	126,08	417,09
CP_104	4	central	6	50	0,65	0,60	175	665,04	470,52	150,71	494,07
CP_104	5	central	6	50	0,65	0,60	175	746,10	523,75	177,65	553,05
CP_104	6	central	6	50	0,65	0,60	175	811,52	560,86	205,93	597,47
CP_104	7	central	6	50	0,65	0,60	175	855,46	587,83	232,25	632,05

Continua

Continuação

Arq.	Passe	Trat.	5	40	0,43	0,40	150	Fz_pico	Fz_med	Fxy	FR
			6	50	0,65	0,60	175				
			8	60	0,80	0,80	200				
			Diâmetro	Ângulo	Espessura	Incremento	Avanço				
			d_t	α	t	Δz	f	(N)	(N)	(N)	(N)
			(mm)	(°)	(mm)	(mm)	(mm/min)	(N)	(N)	(N)	(N)
CP_105	1	central	6	50	0,65	0,60	175	303,72	242,13	59,13	249,24
CP_105	2	central	6	50	0,65	0,60	175	478,52	359,87	116,94	378,40
CP_105	3	central	6	50	0,65	0,60	175	621,10	444,38	171,67	476,39
CP_105	4	central	6	50	0,65	0,60	175	726,56	515,90	211,16	557,44
CP_105	5	central	6	50	0,65	0,60	175	834,96	574,63	254,19	628,34
CP_105	6	central	6	50	0,65	0,60	175	923,82	620,44	300,84	689,53
CP_105	7	central	6	50	0,65	0,60	175	981,44	647,01	338,37	730,15
CP_106	1	central	6	50	0,65	0,60	175	267,58	202,08	38,72	205,76
CP_106	2	central	6	50	0,65	0,60	175	434,58	315,92	85,45	327,27
CP_106	3	central	6	50	0,65	0,60	175	565,42	401,31	124,50	420,18
CP_106	4	central	6	50	0,65	0,60	175	669,92	477,13	153,46	501,20
CP_106	5	central	6	50	0,65	0,60	175	744,14	530,34	181,62	560,58
CP_106	6	central	6	50	0,65	0,60	175	810,54	568,41	211,52	606,49
CP_106	7	central	6	50	0,65	0,60	175	857,42	596,87	242,56	644,28

FONTE: O autor.

A tabela abaixo apresenta as médias dos esforços em Fz_pico, FR, Fz_médio e Fxy, conforme discutido no tópico 5.2. Entretanto, nessa condição foram 10 repetições, ou seja, o nível de confiança do modelo estimado tende a ser inclusive maior que o nível atribuído aos testes com 3 repetições.

Um aspecto importante nesse teste é o revestimento dos corpos de prova que compõem o nível central, ou seja, na espessura de chapa $t=0,65\text{mm}$ o revestimento é o galvalume, embora seja muito provável que não haja influência significativa nos resultados obtidos deve-se, com certeza, considerar um estudo futuro acerca dessas diferenças.

TABELA 27 - MÉDIAS DOS ESFORÇOS FZ_PICO, FR, FZ_MÉDIO E FXY PARA AS 10 REPETIÇÕES NO TRAT. CENTRAL.

Passe	Fz_pico (Corpo de Prova)										Média
	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	
1	265,62	271,48	261,72	269,54	248,04	305,66	248,04	262,70	303,72	267,58	270,41
2	421,88	435,54	414,06	486,32	430,66	499,02	422,86	426,76	478,52	434,58	445,02
3	549,80	568,36	551,76	621,10	569,34	630,86	550,78	559,58	621,10	565,42	578,81
4	654,30	670,90	657,22	729,50	673,82	733,40	656,26	665,04	726,56	669,92	683,69
5	734,38	748,04	743,16	815,42	753,90	818,36	748,04	746,10	834,96	744,14	768,65
6	806,64	813,48	808,60	882,82	829,10	879,88	820,32	811,52	923,82	810,54	838,67
7	853,52	856,44		931,64	891,60	930,66	867,18	855,46	981,44	857,42	891,71

Continua

Continuação

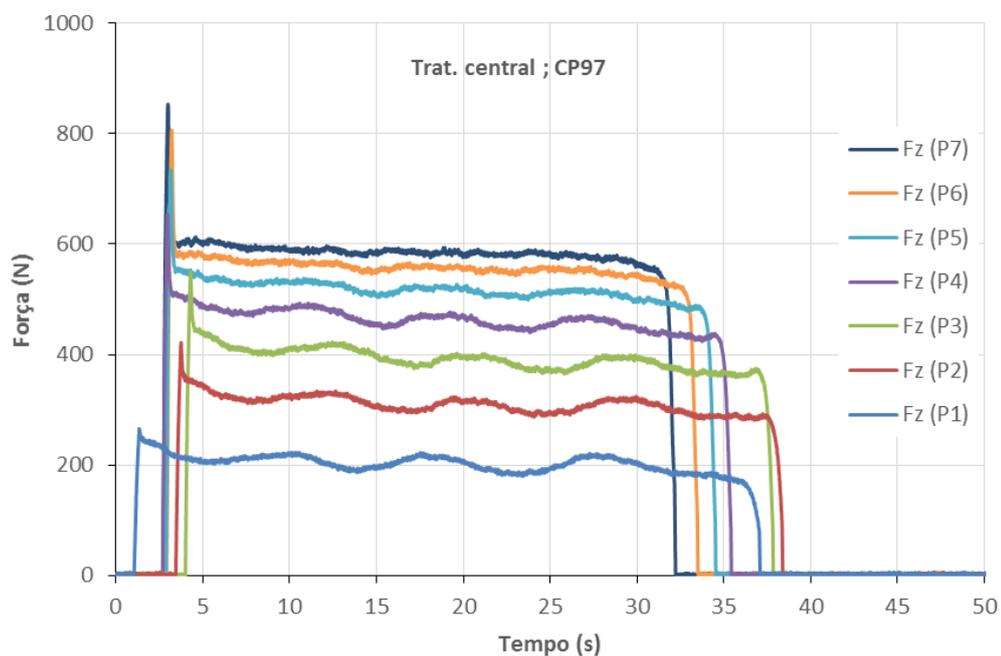
Passe	FR (Corpo de Prova)										Média
	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	
1	207,56	218,29	209,69	237,06	201,28	239,44	202,11	206,60	249,24	205,76	217,70
2	320,64	326,93	325,48	367,44	329,65	370,91	329,61	327,65	378,40	327,27	340,40
3	409,02	416,73	414,64	463,44	424,91	466,86	420,17	417,09	476,39	420,18	432,94
4	485,48	489,75	490,72	542,98	506,54	546,03	499,37	494,07	557,44	501,20	511,36
5	544,70	547,07	550,72	605,42	572,47	604,70	559,70	553,05	628,34	560,58	572,68
6	592,13	592,95	597,56	655,02	629,22	649,73	605,29	597,47	689,53	606,49	621,54
7	628,03	628,71		694,72	674,46	685,16	641,57	632,05	730,15	644,28	662,12

Passe	Fz_médio (Corpo de Prova)										Média
	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	
1	202,48	212,71	204,57	231,46	196,38	233,70	197,82	201,92	242,13	202,08	212,52
2	309,19	315,78	313,81	354,18	315,87	357,19	317,35	315,65	359,87	315,92	327,48
3	391,13	399,35	396,43	443,62	402,57	445,94	401,00	397,58	444,38	401,31	412,33
4	463,39	468,66	468,35	518,61	475,21	520,80	476,46	470,52	515,90	477,13	485,50
5	517,04	520,56	522,13	574,60	528,65	573,17	531,21	523,75	574,63	530,34	539,61
6	557,32	559,84	561,11	615,31	568,88	610,63	569,06	560,86	620,44	568,41	579,19
7	585,36	587,75		643,65	596,62	638,17	596,67	587,83	647,01	596,87	608,88

Passe	Fxy (Corpo de Prova)										Média
	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	
1	45,64	49,07	46,02	51,25	44,17	52,08	41,44	43,74	59,13	38,72	47,13
2	84,93	84,68	86,38	97,80	94,31	99,94	89,03	87,84	116,94	85,45	92,73
3	119,64	119,10	121,51	134,08	135,97	138,18	125,48	126,08	171,67	124,50	131,62
4	144,78	142,17	146,48	160,85	175,38	164,06	149,53	150,71	211,16	153,46	159,86
5	171,36	168,24	175,15	190,71	219,65	192,74	176,30	177,65	254,19	181,62	190,76
6	200,04	195,35	205,50	224,61	268,87	221,98	206,27	205,93	300,84	211,52	224,09
7	227,52	223,22		261,45	314,56	249,38	235,79	232,25	338,37	242,56	258,35

FONTE: O autor.

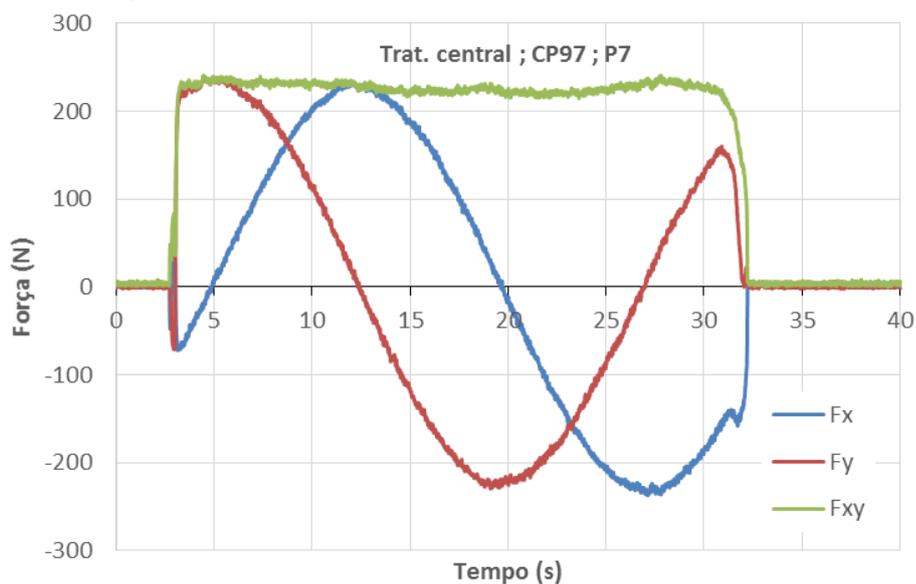
FIGURA 83 - COMPORTAMENTO DOS ESFORÇOS EM FZ NOS 7 PASSES PARA O TRAT. CENTRAL, CP97.



FONTE: O autor.

No gráfico da FIGURA 83 encontram-se as curvas referentes ao comportamento do esforço em z para os 7 passes conduzidos no tratamento, bem como o destaque para o ponto Fz_pico. Novamente caracteriza-se uma tendência de estabilidade na forma da curva a partir do 3º passe.

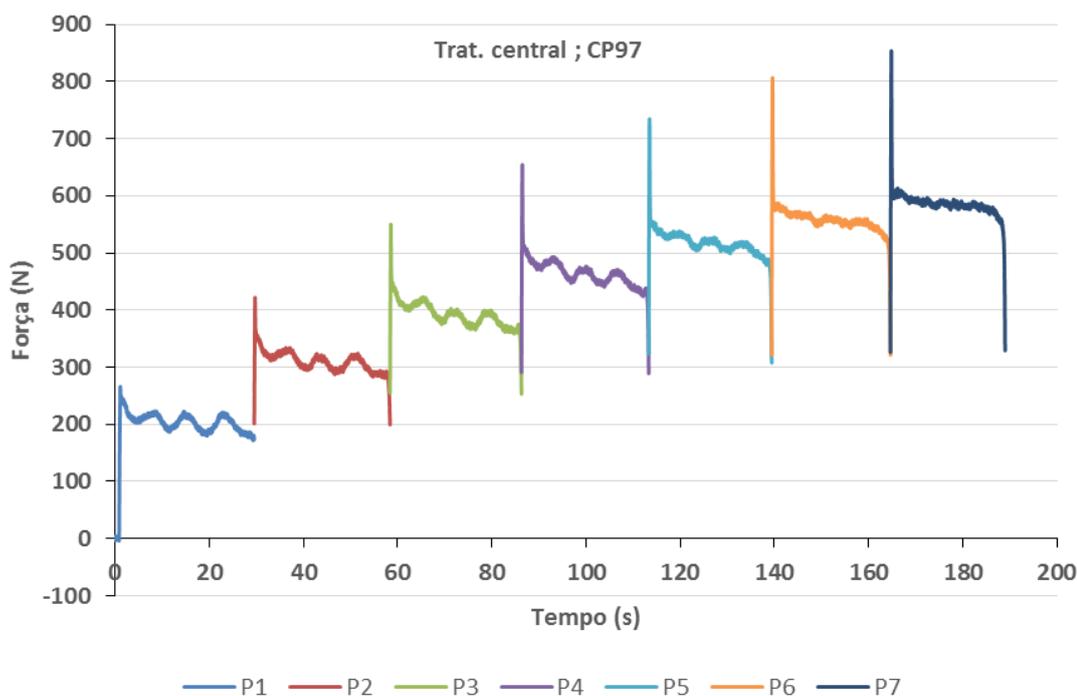
FIGURA 84 - COMPORTAMENTO DOS ESFORÇOS EM FX, FY E FXY NO PASSE 7 PARA O TRAT. CENTRAL, CP97.



FONTE: O autor.

No gráfico superior verificam-se as curvas F_x , F_y e F_{xy} que evidenciam o comportamento quase estável dos esforços no plano xy ao longo da trajetória circular realizada pelo punção.

FIGURA 85 - COMPORTAMENTO DO ESFORÇO F_z AO LONGO DE 7 PASSES PARA O TRAT. CENTRAL, CP97.

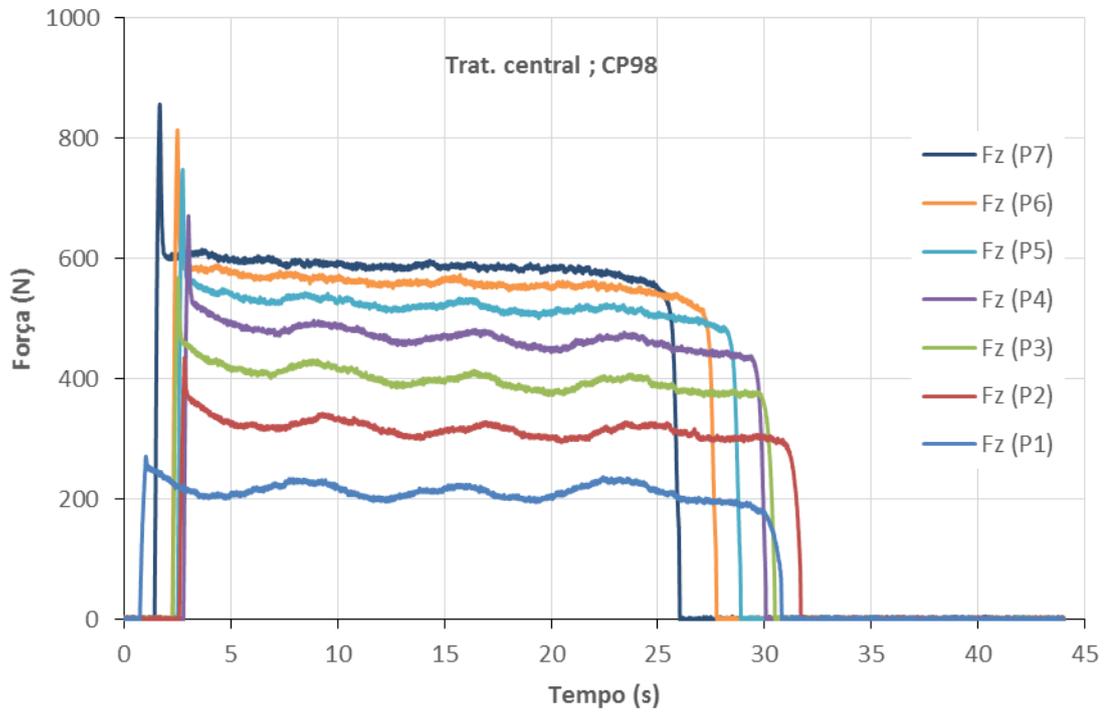


FONTE: O autor.

Na FIGURA 85 observam-se os patamares escalonados das curvas dos esforços em z ao longo de todo o teste e os seus respectivos picos de carga que são as forças F_{z_pico} em cada passe. Evidenciando que o comportamento das curvas tende a se estabilizar em patamares maiores.

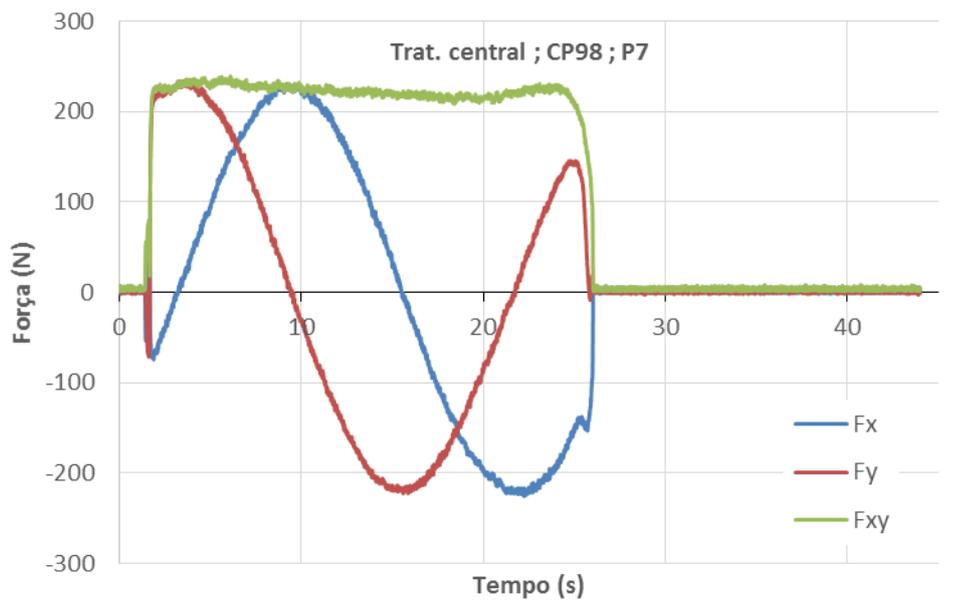
No gráfico da FIGURA 86 tem-se as curvas referentes ao comportamento do esforço em z para os 7 passes conduzidos no tratamento do corpo de prova 98, bem como na FIGURA 87 para as forças em x , y e xy .

FIGURA 86 - COMPORTAMENTO DOS ESFORÇOS EM FZ NOS 7 PASSES PARA O TRAT. CENTRAL, CP98.



FONTE: O autor.

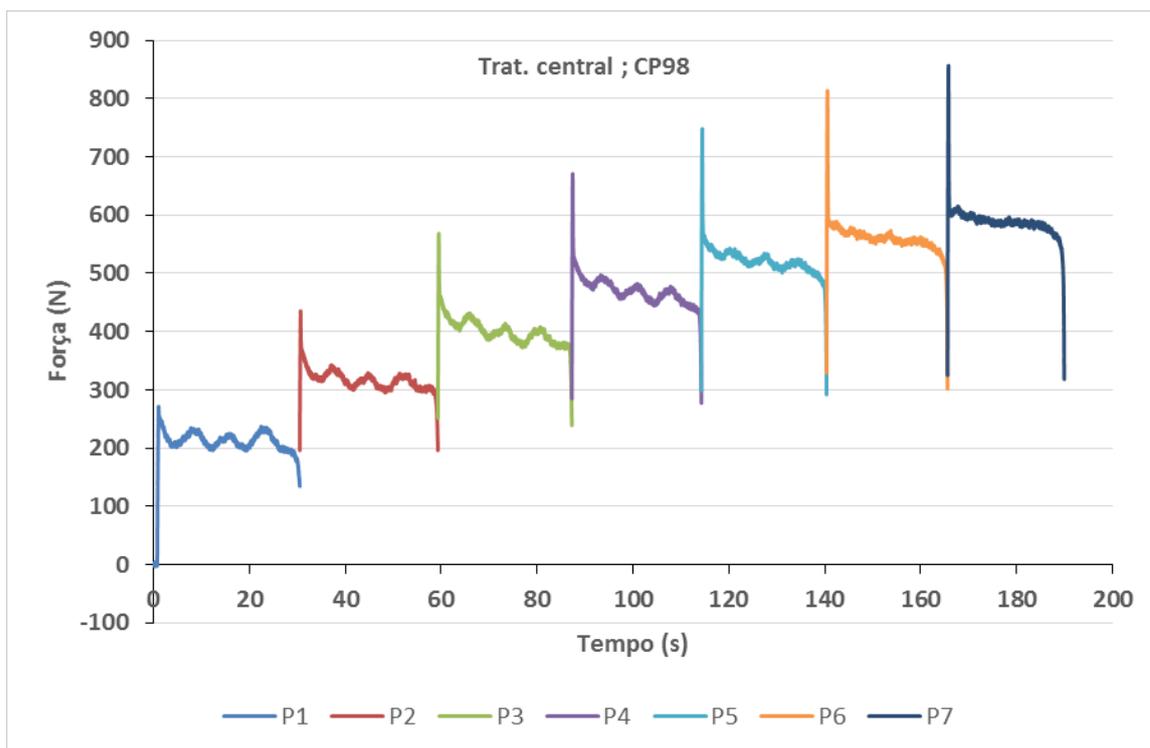
FIGURA 87 - COMPORTAMENTO DOS ESFORÇOS EM FX, FY E FXY NO PASSE 7 PARA O TRAT. CENTRAL, CP98.



FONTE: O autor.

No gráfico a seguir observam-se os patamares escalonados das curvas dos esforços em z ao longo de todo o teste e os seus respectivos picos de carga que são as forças Fz_pico em cada passe.

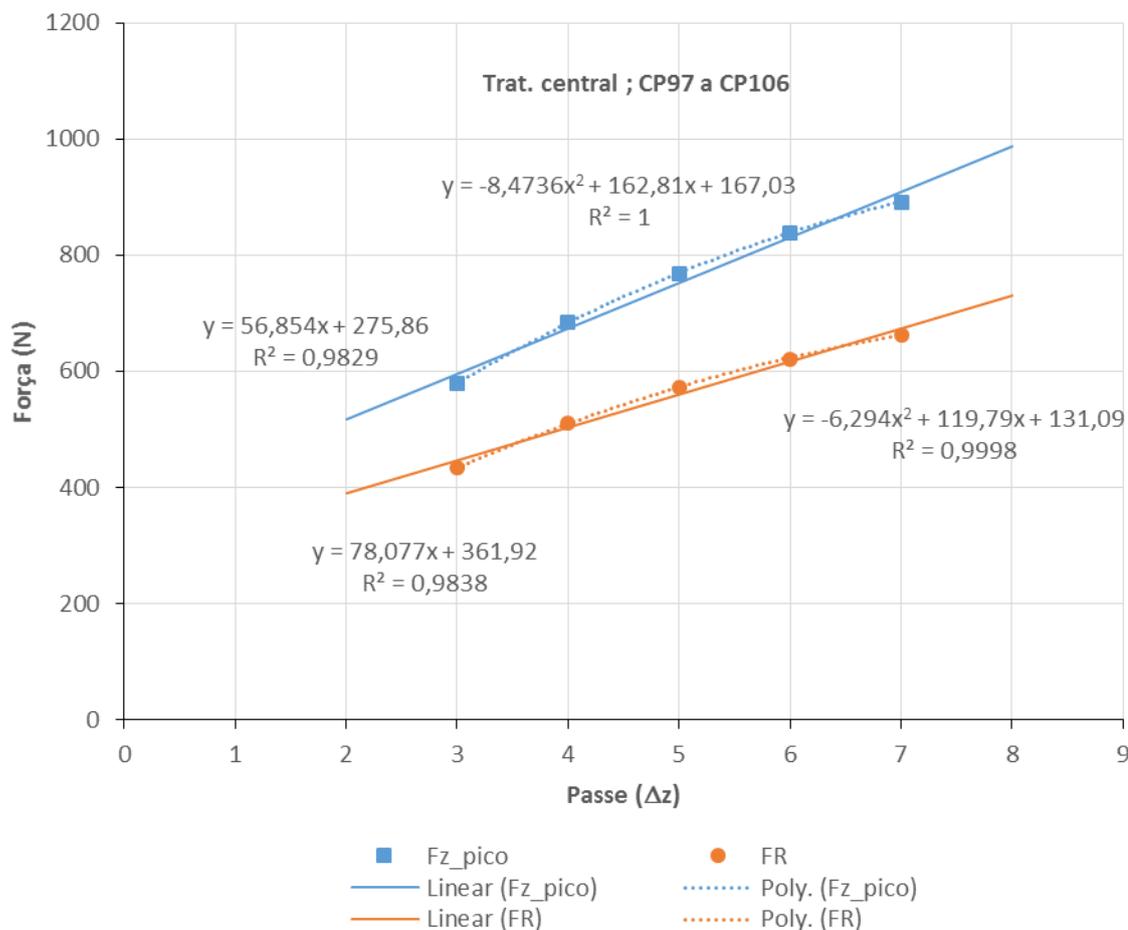
FIGURA 88 - COMPORTAMENTO DO ESFORÇO FZ AO LONGO DE 7 PASSES PARA O TRAT. CENTRAL, CP98.



FONTE: O autor.

A análise de regressão do modelo de forma simples, ou seja, considerando apenas a variação no incremento Δz dos passes de 3 a 7 pode ser observada na FIGURA 89 da próxima página. Destaca-se que foram utilizadas as médias Fz_pico e FR das 10 repetições, conforme TABELA 16. Cabe ressaltar o excelente nível de qualidade do modelo gerado, isto é, o valor de R^2 está acima de 0,98 tanto para a regressão linear quanto para a regressão polinomial que está até acima de 0,99, para Fz_pico e para FR globalmente. Logo, pode-se assumir com razoável tranquilidade o modelo estatístico linear como sendo a equação que representa o fenômeno sob investigação.

FIGURA 89 - ANÁLISE DE REGRESSÃO DO MODELO PARA O TRAT. CENTRAL NAS 10 REPETIÇÕES; CP97 A CP106.



FONTE: O autor.

5.4 EM RELAÇÃO AO DIÂMETRO DO PUNÇÃO $D_T=8\text{MM}$

Na TABELA 28 destacam-se os valores obtidos das forças; Fz_pico , Fz_med , Fxy e FR para os testes cujo o diâmetro do punção é $d_t=8\text{mm}$, ou seja, os valores compilados em *Newton* (N) para os respectivos esforços nos passes 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7, apenas na 1ª rodada ($n=1$) das 3 repetições conduzidas. Sendo que as demais encontram-se no APÊNDICE B.

TABELA 28 - RESULTADOS OBTIDOS DOS ESFORÇOS PARA O FATOR PRINCIPAL DIÂMETRO DO PUNÇÃO $D_T=8\text{MM}$.

Arq.	Passe	Trat.	5	40	0,43	0,40	150	Fz_pico (N)	Fz_med (N)	Fxy (N)	FR (N)
			6	50	0,65	0,60	175				
			8	60	0,80	0,80	200				
			Diâmetro	Ângulo	Espessura	Incremento	Avanço				
			d_t (mm)	α (°)	t (mm)	Δz (mm)	f (mm/min)				
CP_2	1	a	8	40	0,43	0,40	150	44,92	27,66	5,10	28,12
CP_2	2	a	8	40	0,43	0,40	150	112,30	88,44	17,51	90,16
CP_2	3	a	8	40	0,43	0,40	150	190,42	139,96	31,49	143,46
CP_2	4	a	8	40	0,43	0,40	150	243,16	176,67	43,71	182,00
CP_2	5	a	8	40	0,43	0,40	150	274,42	204,27	52,53	210,91
CP_2	6	a	8	40	0,43	0,40	150	309,58	229,54	61,55	237,64
CP_2	7	a	8	40	0,43	0,40	150	339,84	251,52	71,20	261,41
CP_4	1	ab	8	60	0,43	0,40	150	67,38	52,24	8,05	52,86
CP_4	2	ab	8	60	0,43	0,40	150	144,54	111,99	21,26	114,00
CP_4	3	ab	8	60	0,43	0,40	150	225,58	161,79	33,56	165,23
CP_4	4	ab	8	60	0,43	0,40	150	273,44	194,29	43,83	199,17
CP_4	5	ab	8	60	0,43	0,40	150	314,46	220,74	53,82	227,20
CP_4	6	ab	8	60	0,43	0,40	150	347,66	244,88	64,08	253,13
CP_4	7	ab	8	60	0,43	0,40	150	380,86	266,30	75,86	276,89
CP_6	1	ac	8	40	0,80	0,40	150	336,92	264,53	47,72	268,80
CP_6	2	ac	8	40	0,80	0,40	150	458,00	360,48	73,21	367,84
CP_6	3	ac	8	40	0,80	0,40	150	579,10	448,78	101,82	460,18
CP_6	4	ac	8	40	0,80	0,40	150	683,60	525,04	130,73	541,07
CP_6	5	ac	8	40	0,80	0,40	150	769,54	591,46	149,42	610,04
CP_6	6	ac	8	40	0,80	0,40	150	846,68	655,25	164,89	675,68
CP_6	7	ac	8	40	0,80	0,40	150	921,88	713,03	180,20	735,45
CP_8	1	abc	8	60	0,80	0,40	150	366,22	271,47	49,67	275,98
CP_8	2	abc	8	60	0,80	0,40	150	469,72	371,54	72,53	378,55
CP_8	3	abc	8	60	0,80	0,40	150	591,80	470,60	100,24	481,16
CP_8	4	abc	8	60	0,80	0,40	150	713,86	562,50	123,90	575,99
CP_8	5	abc	8	60	0,80	0,40	150	817,38	640,89	147,45	657,63
CP_8	6	abc	8	60	0,80	0,40	150	912,10	707,44	172,10	728,07
CP_8	7	abc	8	60	0,80	0,40	150	996,10	765,08	197,31	790,11
CP_10	1	ad	8	40	0,43	0,80	150	128,90	103,78	27,95	107,47
CP_10	2	ad	8	40	0,43	0,80	150	320,32	196,11	75,55	210,16
CP_10	3	ad	8	40	0,43	0,80	150	412,10	253,47	110,25	276,41
CP_10	4	ad	8	40	0,43	0,80	150	493,16	297,37	147,62	332,00
CP_10	5	ad	8	40	0,43	0,80	150	560,54	330,43	186,49	379,43
CP_10	6	ad	8	40	0,43	0,80	150	606,44	354,33	221,03	417,62
CP_10	7	ad	8	40	0,43	0,80	150				
CP_12	1	abd	8	60	0,43	0,80	150	125,98	98,74	19,63	100,67
CP_12	2	abd	8	60	0,43	0,80	150	343,76	200,31	58,26	208,61
CP_12	3	abd	8	60	0,43	0,80	150	452,14	264,28	87,27	278,31
CP_12	4	abd	8	60	0,43	0,80	150	547,86	310,33	120,15	332,78
CP_12	5	abd	8	60	0,43	0,80	150	627,92	346,10	154,99	379,22
CP_12	6	abd	8	60	0,43	0,80	150	684,58	378,42	189,38	423,17
CP_12	7	abd	8	60	0,43	0,80	150	725,58	403,01	219,69	459,00
CP_14	1	acd	8	40	0,80	0,80	150	480,46	393,05	94,02	404,14
CP_14	2	acd	8	40	0,80	0,80	150	779,30	573,75	165,00	597,00
CP_14	3	acd	8	40	0,80	0,80	150	1001,96	703,75	236,08	742,30
CP_14	4	acd	8	40	0,80	0,80	150	1172,86	828,08	280,49	874,29
CP_14	5	acd	8	40	0,80	0,80	150	1305,66	922,25	320,95	976,50

Continua

Continuação

Arq.	Passe	Trat.	5	40	0,43	0,40	150	Fz_pico (N)	Fz_med (N)	Fxy (N)	FR (N)
			6	50	0,65	0,60	175				
			8	60	0,80	0,80	200				
			Diâmetro	Ângulo	Espessura	Incremento	Avanço				
			d _t (mm)	α (°)	t (mm)	Δz (mm)	f (mm/min)				
CP_16	1	abcd	8	60	0,80	0,80	150	509,76	403,78	99,13	415,77
CP_16	2	abcd	8	60	0,80	0,80	150	849,60	606,00	163,45	627,66
CP_16	3	abcd	8	60	0,80	0,80	150	1122,08	774,55	233,18	808,89
CP_16	4	abcd	8	60	0,80	0,80	150	1335,94	895,21	295,44	942,70
CP_16	5	abcd	8	60	0,80	0,80	150	1498,04	976,18	363,54	1041,68
CP_16	6	abcd	8	60	0,80	0,80	150	1610,36	1028,50	430,51	1114,97
CP_16	7	abcd	8	60	0,80	0,80	150	1681,64	1054,61	491,38	1163,47
CP_18	1	ae	8	40	0,43	0,40	200	65,42	42,20	7,47	42,85
CP_18	2	ae	8	40	0,43	0,40	200	133,78	102,39	23,33	105,01
CP_18	3	ae	8	40	0,43	0,40	200	204,10	147,97	38,14	152,80
CP_18	4	ae	8	40	0,43	0,40	200	247,08	182,14	48,10	188,38
CP_18	5	ae	8	40	0,43	0,40	200	281,26	210,44	57,45	218,14
CP_18	6	ae	8	40	0,43	0,40	200	317,38	234,23	67,17	243,68
CP_18	7	ae	8	40	0,43	0,40	200	345,70	255,50	78,66	267,34
CP_20	1	abe	8	60	0,43	0,40	200	56,64	30,59	6,06	31,18
CP_20	2	abe	8	60	0,43	0,40	200	110,36	91,59	20,06	93,76
CP_20	3	abe	8	60	0,43	0,40	200	196,28	145,45	34,75	149,54
CP_20	4	abe	8	60	0,43	0,40	200	255,86	183,47	47,01	189,39
CP_20	5	abe	8	60	0,43	0,40	200	291,02	212,71	57,20	220,27
CP_20	6	abe	8	60	0,43	0,40	200	333,98	238,79	68,59	248,45
CP_20	7	abe	8	60	0,43	0,40	200	369,14	261,12	80,09	273,12
CP_22	1	ace	8	40	0,80	0,40	200	341,80	270,89	49,25	275,33
CP_22	2	ace	8	40	0,80	0,40	200	456,06	362,30	72,48	369,48
CP_22	3	ace	8	40	0,80	0,40	200	582,04	455,76	102,03	467,04
CP_22	4	ace	8	40	0,80	0,40	200	696,28	535,84	131,88	551,83
CP_22	5	ace	8	40	0,80	0,40	200	776,36	604,53	152,60	623,49
CP_22	6	ace	8	40	0,80	0,40	200	856,44	668,79	169,14	689,85
CP_22	7	ace	8	40	0,80	0,40	200	933,60	727,55	185,38	750,80
CP_24	1	abce	8	60	0,80	0,40	200	342,78	279,04	51,52	283,75
CP_24	2	abce	8	60	0,80	0,40	200	472,66	378,24	75,51	385,70
CP_24	3	abce	8	60	0,80	0,40	200	617,18	487,44	106,92	499,03
CP_24	4	abce	8	60	0,80	0,40	200	747,08	586,17	132,74	601,01
CP_24	5	abce	8	60	0,80	0,40	200	851,56	667,90	158,05	686,34
CP_24	6	abce	8	60	0,80	0,40	200	947,26	736,21	183,79	758,80
CP_24	7	abce	8	60	0,80	0,40	200	1037,10	794,61	209,22	821,69
CP_26	1	ade	8	40	0,43	0,80	200	124,02	96,58	19,60	98,55
CP_26	2	ade	8	40	0,43	0,80	200	321,28	191,77	59,26	200,71
CP_26	3	ade	8	40	0,43	0,80	200	414,06	251,52	86,37	265,93
CP_26	4	ade	8	40	0,43	0,80	200	492,18	296,99	116,08	318,87
CP_26	5	ade	8	40	0,43	0,80	200	559,58	330,70	143,91	360,66
CP_26	6	ade	8	40	0,43	0,80	200	603,52	354,45	165,87	391,34
CP_26	7	ade	8	40	0,43	0,80	200	631,84	367,76	178,85	408,95
CP_28	1	abde	8	60	0,43	0,80	200	147,46	112,34	23,98	114,87
CP_28	2	abde	8	60	0,43	0,80	200	377,92	225,04	69,98	235,66
CP_28	3	abde	8	60	0,43	0,80	200	492,18	292,36	102,92	309,95
CP_28	4	abde	8	60	0,43	0,80	200	594,72	340,71	138,78	367,89
CP_28	5	abde	8	60	0,43	0,80	200	673,82	377,78	176,79	417,10
CP_28	6	abde	8	60	0,43	0,80	200	739,26	412,11	213,89	464,31
CP_28	7	abde	8	60	0,43	0,80	200	777,34	437,50	247,11	502,46

Continua

Continuação

Arq.	Passe	Trat.	5	40	0,43	0,40	150	Fz_pico	Fz_med	Fxy	FR
			6	50	0,65	0,60	175				
			8	60	0,80	0,80	200				
			Diâmetro	Ângulo	Espessura	Incremento	Avanço				
			d_t	α	t	Δz	f	(N)	(N)	(N)	(N)
			(mm)	(°)	(mm)	(mm)	(mm/min)	(N)	(N)	(N)	(N)
CP_30	1	acde	8	40	0,80	0,80	200	513,68	400,27	98,84	412,29
CP_30	2	acde	8	40	0,80	0,80	200	774,42	571,14	166,92	595,03
CP_30	3	acde	8	40	0,80	0,80	200	988,28	701,59	240,63	741,70
CP_30	4	acde	8	40	0,80	0,80	200	1158,20	827,13	286,45	875,33
CP_30	5	acde	8	40	0,80	0,80	200	1303,72	922,74	330,88	980,27
CP_30	6	acde	8	40	0,80	0,80	200	1404,30	983,06	379,00	1053,58
CP_30	7	acde	8	40	0,80	0,80	200	1466,80	1016,16	412,86	1096,83
CP_32	1	abcde	8	60	0,80	0,80	200	537,10	405,62	100,81	417,96
CP_32	2	abcde	8	60	0,80	0,80	200	856,44	608,82	166,84	631,27
CP_32	3	abcde	8	60	0,80	0,80	200	1126,96	777,06	237,34	812,50
CP_32	4	abcde	8	60	0,80	0,80	200	1333,98	898,70	298,22	946,89
CP_32	5	abcde	8	60	0,80	0,80	200	1501,96	980,40	363,17	1045,51
CP_32	6	abcde	8	60	0,80	0,80	200	1609,38	1031,53	429,56	1117,40
CP_32	7	abcde	8	60	0,80	0,80	200	1682,62	1058,89	490,35	1166,92

FONTE: O autor.

Na TABELA 29 estão organizadas as médias dos esforços para o tratamento “abcde”, a partir das 3 repetições; CP32, CP64 e CP96. Essa combinação “abcde” ocorre quando o fator principal diâmetro do punção está fixo no nível alto (+1), $d_t=8\text{mm}$, e os demais também estão ajustados nos níveis altos (+1), ou seja, a combinação “abcde” = +1,+1,+1,+1,+1.

TABELA 29 - MÉDIAS DOS ESFORÇOS FZ_PICO, FR, FZ_MÉDIO E FXY PARA AS 3 REPETIÇÕES NO TRATAMENTO “BCDE”.

Passe	Corpo de Prova			Média
	32	64	96	
	Fz_pico			
1	537,10	505,86	509,76	517,57
2	856,44	845,70	828,12	843,42
3	1126,96	1111,32	1105,46	1114,58
4	1333,98	1318,36	1326,18	1326,17
5	1501,96	1481,44	1490,24	1491,21
6	1609,38	1602,54	1606,44	1606,12
7	1682,62	1687,50	1695,32	1688,48

Passe	Corpo de Prova			Média
	32	64	96	
	FR			
1	417,96	407,40	408,28	411,21
2	631,27	625,73	628,44	628,48
3	812,50	810,73	812,60	811,94
4	946,89	950,01	951,80	949,57
5	1045,51	1049,42	1051,64	1048,86
6	1117,40	1121,14	1123,61	1120,71
7	1166,92	1169,34	1172,92	1169,73

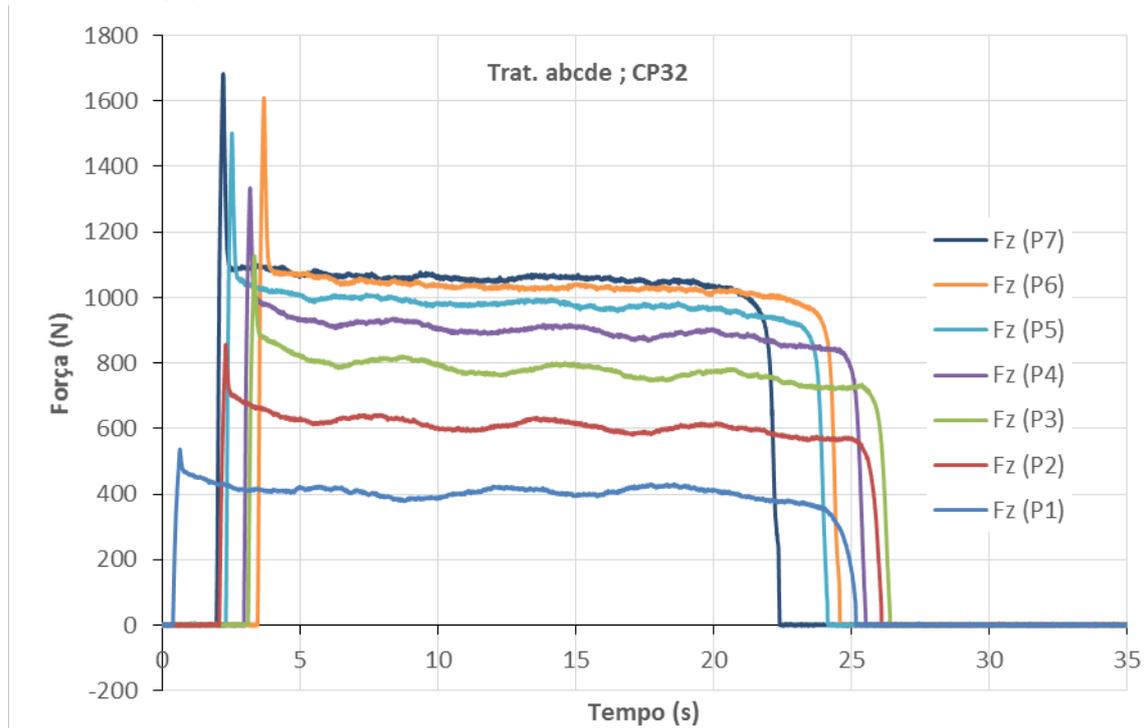
Passe	Corpo de Prova			Média
	32	64	96	
	Fz_médio			
1	405,62	395,55	396,36	399,18
2	608,82	603,89	605,39	606,03
3	777,06	776,75	776,91	776,90
4	898,70	903,45	902,71	901,62
5	980,40	985,43	984,67	983,50
6	1031,53	1036,16	1035,96	1034,55
7	1058,89	1062,37	1062,96	1061,41

Passe	Corpo de Prova			Média
	32	64	96	
	Fxy			
1	100,81	97,54	97,93	98,76
2	166,84	163,90	168,62	166,45
3	237,34	232,26	238,19	235,93
4	298,22	293,76	301,74	297,91
5	363,17	360,85	369,29	364,43
6	429,56	428,17	435,06	430,93
7	490,35	488,60	495,84	491,60

FONTE: O autor

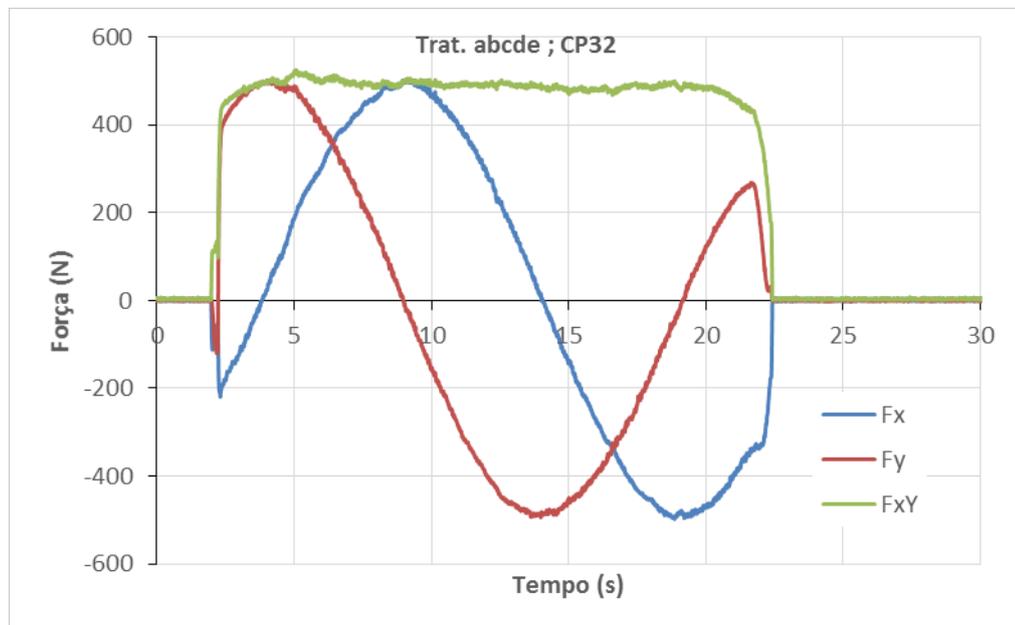
No gráfico abaixo encontram-se as curvas referentes ao comportamento dos esforços em z para os 7 passes conduzidos no tratamento, bem como o repique para o ponto Fz_pico. Nessa configuração tem-se os maiores esforços de deformação e, nitidamente, verifica-se no gráfico uma tendência de suavização do comportamento das curvas a partir do 3º passe.

FIGURA 90 - COMPORTAMENTO DOS ESFORÇOS EM FZ NOS 7 PASSES PARA O TRAT. "ABCDE", CP32.



FONTE: O autor.

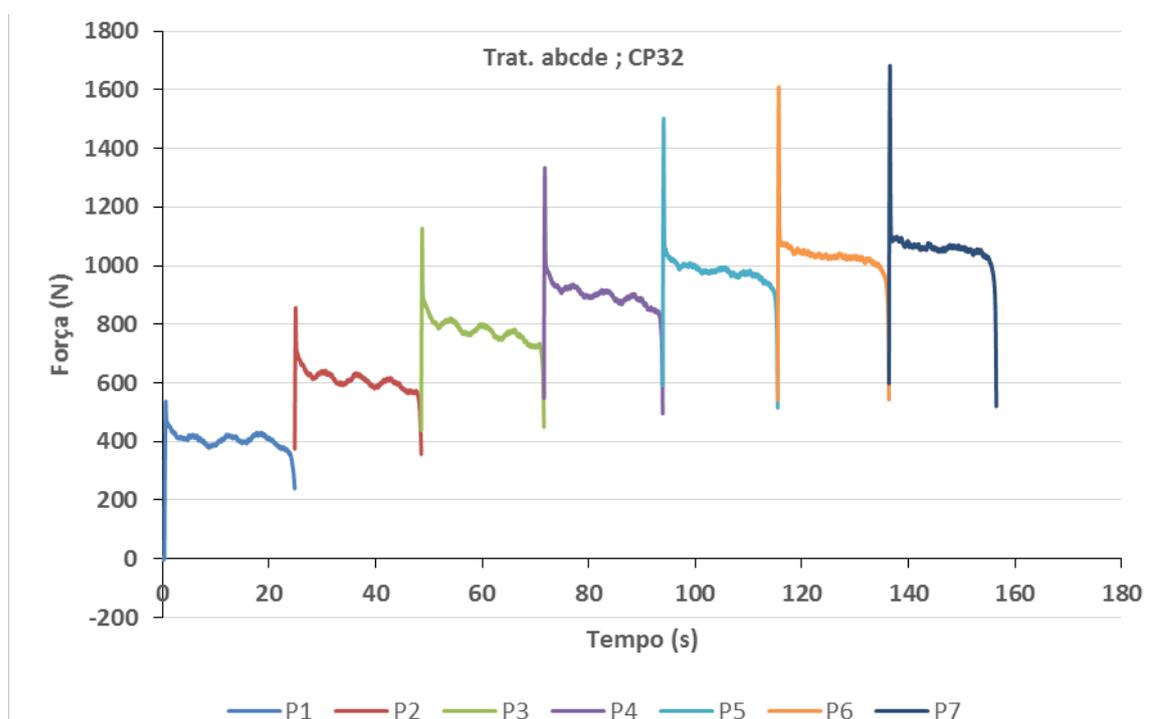
FIGURA 91 - COMPORTAMENTO DOS ESFORÇOS EM FX, FY E FXY NO PASSE 7 PARA O TRAT. "ABCDE", CP32.



FONTE: O autor.

No gráfico anterior verificam-se as curvas F_x , F_y e F_{xy} que evidenciam o comportamento quase estável dos esforços no plano xy ao longo da trajetória circular realizada pelo punção. Percebe-se, todavia, uma leve tendência de decréscimo da força F_{xy} no decorrer do monitoramento, possivelmente do leve alívio dos esforços sofridos pelo punção.

FIGURA 92 - COMPORTAMENTO DO ESFORÇO F_z AO LONGO DE 7 PASSES PARA O TRAT. "ABCDE", CP32.



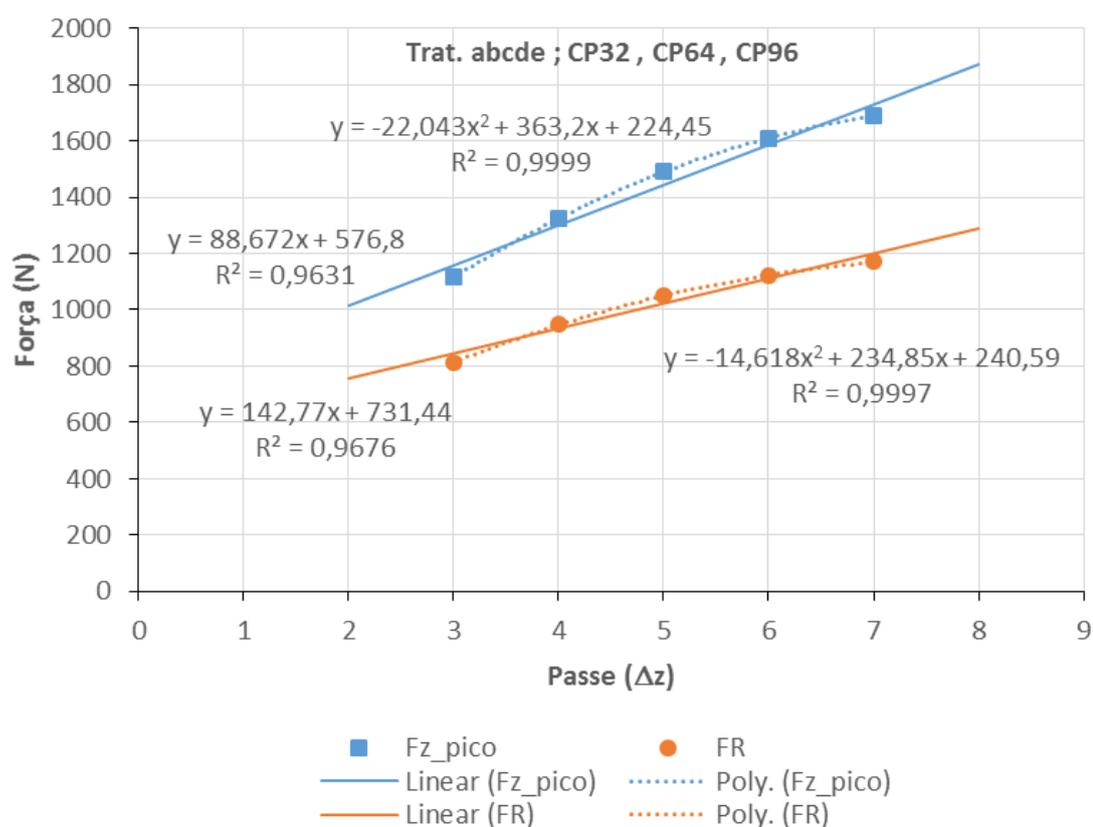
FONTE: O autor.

No FIGURA 92 observam-se os patamares escalonados das curvas dos esforços em z ao longo de todo o teste e os seus respectivos picos de carga que são as forças F_{z_pico} em cada passe. Evidenciando que o comportamento das curvas tende a se estabilizar em patamares maiores. Todavia, nessa combinação que sincroniza todos os fatores no nível mais alto, isto é, todos em (+1), surgem os maiores valores para a variável resposta F e, concomitantemente a maior amplitude entre a F_{z_med} e a F_{z_pico} .

A análise de regressão do modelo de forma simples, ou seja, considerando apenas a variação no incremento Δz dos passes de 3 a 7 pode ser então observada no gráfico da FIGURA 93 da página a seguir.

Na TABELA 30 estão organizadas as médias dos esforços para o tratamento “a”, a partir das 3 repetições; CP2, CP34 e CP66. Essa combinação “a” ocorre quando o fator principal diâmetro do punção está fixo no nível alto (+1), $dt=8\text{mm}$, e os demais estão ajustados nos níveis baixos (-1), ou seja, a combinação “a” = +1,-1,-1,-1,-1.

FIGURA 93 - ANÁLISE DE REGRESSÃO DO MODELO PARA O TRAT. “A” NAS 3 REPETIÇÕES; CP32, CP64 E CP96.



FONTE: O autor.

TABELA 30 - MÉDIAS DOS ESFORÇOS FZ_PICO, FR, FZ_MÉDIO E FXY PARA AS 3 REPETIÇÕES NO TRATAMENTO “A”.

Passe	Corpo de Prova			Média
	2	34	66	
	Fz_pico			
1	44,92	92,78	55,66	64,45
2	112,30	162,10	124,02	132,81
3	190,42	232,42	203,12	208,65
4	243,16	265,62	249,02	252,60
5	274,42	302,74	279,30	285,49
6	309,58	339,84	311,52	320,31
7	339,84	370,12	345,70	351,89

Passe	Corpo de Prova			Média
	2	34	66	
	FR			
1	28,12	71,01	38,21	45,78
2	90,16	128,17	97,61	105,31
3	143,46	171,87	147,57	154,30
4	182,00	205,51	181,08	189,53
5	210,91	234,02	209,69	218,21
6	237,64	261,90	234,78	244,77
7	261,41	288,00	257,64	269,01

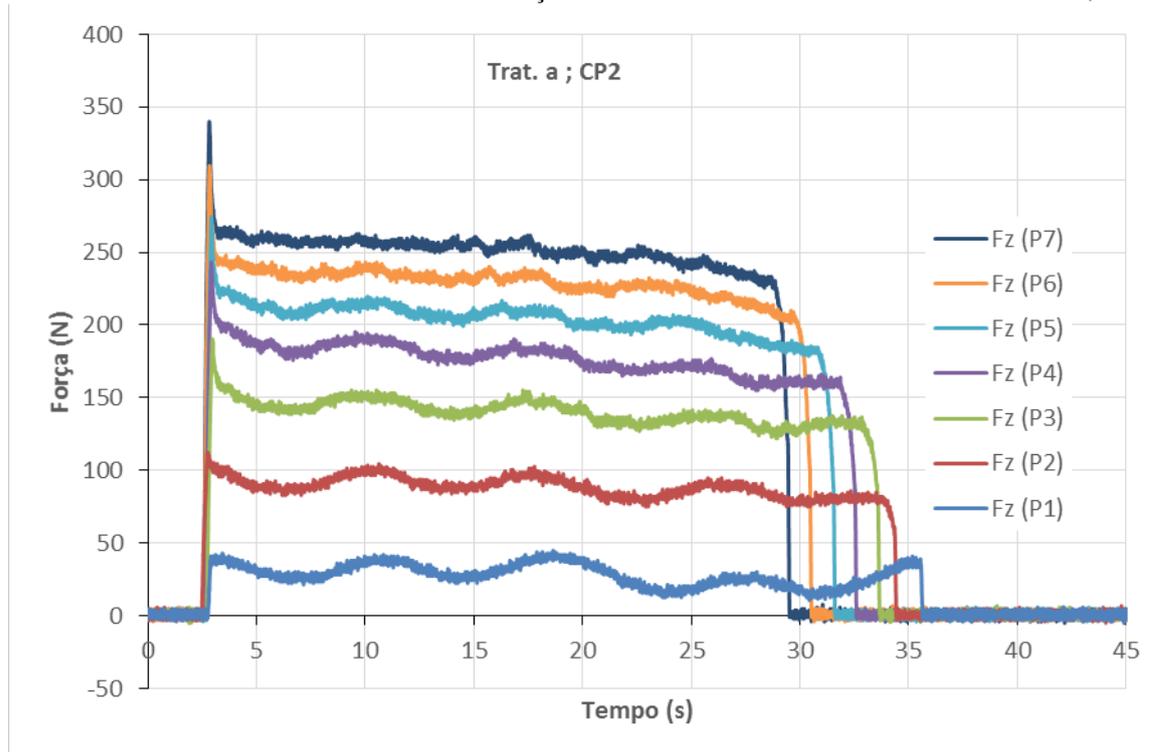
Passe	Corpo de Prova			Média
	2	34	66	
	Fz_médio			
1	27,66	70,01	37,75	45,14
2	88,44	125,31	95,72	103,16
3	139,96	167,23	144,02	150,40
4	176,67	199,40	176,10	184,06
5	204,27	226,34	203,38	211,33
6	229,54	251,33	226,73	235,87
7	251,52	273,75	247,34	257,54

Passe	Corpo de Prova			Média
	2	34	66	
	Fxy			
1	5,10	11,88	5,86	7,61
2	17,51	26,93	19,14	21,19
3	31,49	39,66	32,21	34,45
4	43,71	49,73	42,18	45,20
5	52,53	59,48	51,09	54,37
6	61,55	73,64	60,96	65,38
7	71,20	89,46	72,12	77,59

FONTE: O autor.

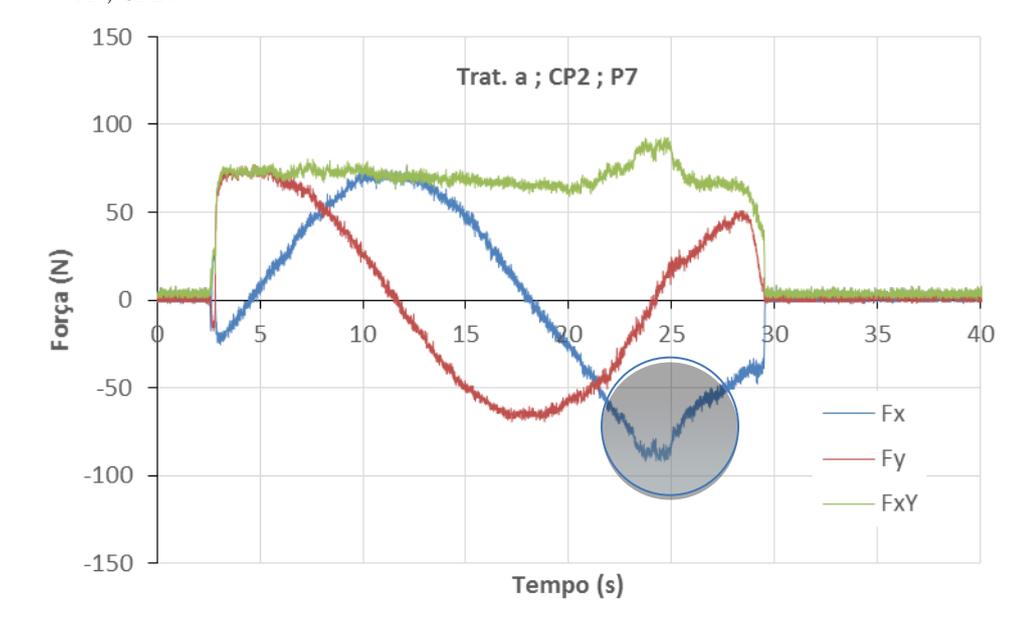
No gráfico a seguir encontram-se as curvas referentes ao comportamento dos esforços em z para os 7 passes conduzidos no tratamento “a”. Nessa figura evidencia-se a redução do tempo de aquisição e o aumento dos esforços no sentido do incremento em Δz .

FIGURA 94 - COMPORTAMENTO DOS ESFORÇOS EM FZ NOS 7 PASSES PARA O TRAT. "A", CP2.



FONTE: O autor.

FIGURA 95 - COMPORTAMENTO DOS ESFORÇOS EM FX, FY E FXY NO PASSE 7 PARA O TRAT. "A", CP2.

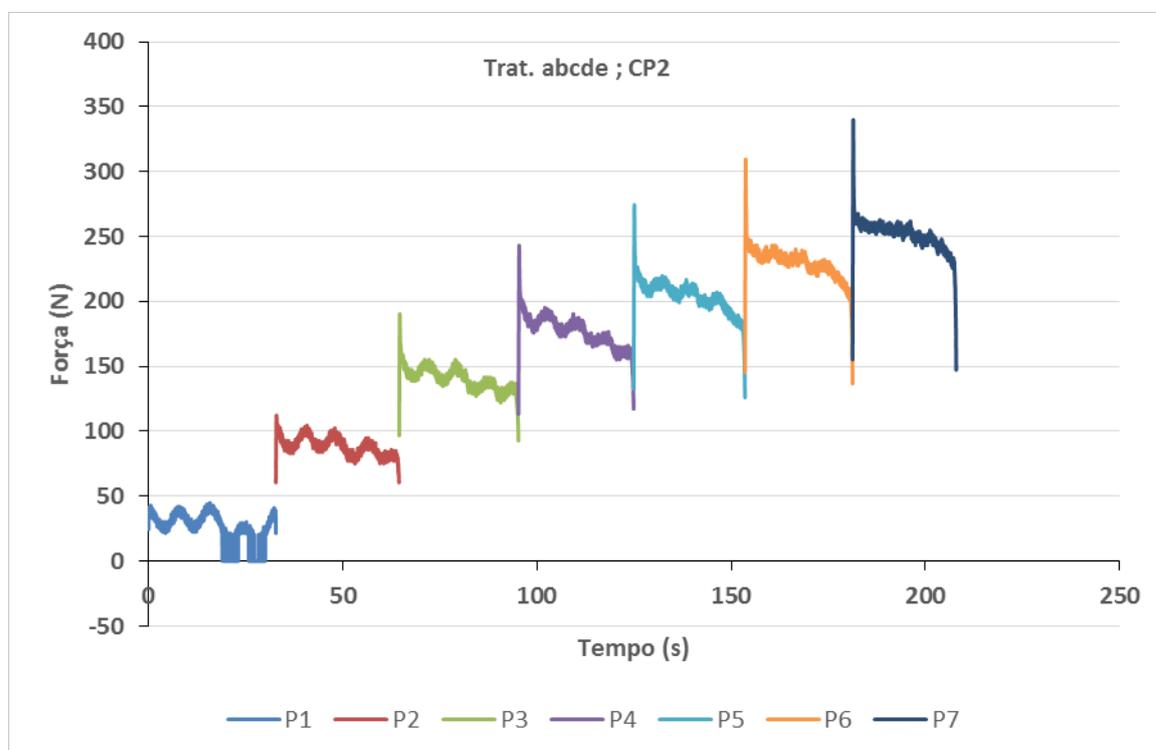


FONTE: O autor.

No gráfico anterior verificam-se as curvas F_x , F_y e F_{xy} que evidenciam o comportamento quase estável dos esforços no plano xy ao longo da trajetória circular realizada pelo punção. Entretanto, próximo do tempo $t=25s$ e destacado pela marca circular ocorre uma pequena oscilação na direção x que deve ser em decorrência da mudança de direção do punção com eventual acúmulo de material na porção em contato punção e peça.

No gráfico da FIGURA 96 observam-se os patamares escalonados das curvas dos esforços em z ao longo de todo o teste e os seus respectivos picos de carga que são as forças F_{z_pico} em cada passe. Destaca-se claramente que no passe 1 os dados apresentam grande variabilidade, ou seja, forte sinal de ruído, porém, como a magnitude da força nesse patamar é pequena pode-se, com bastante certeza, desprezar os dados do passe 1 para a posterior análise estatística. Na realidade, com o intuito de minimizar ao máximo essas perturbações que impactam o sinal ruído optou-se, sem prejuízo qualquer às análises, descartar os passes 1 e 2 de todas as amostras durante as análises de regressão e, em especial, no experimento fatorial completo descrito no capítulo 6.

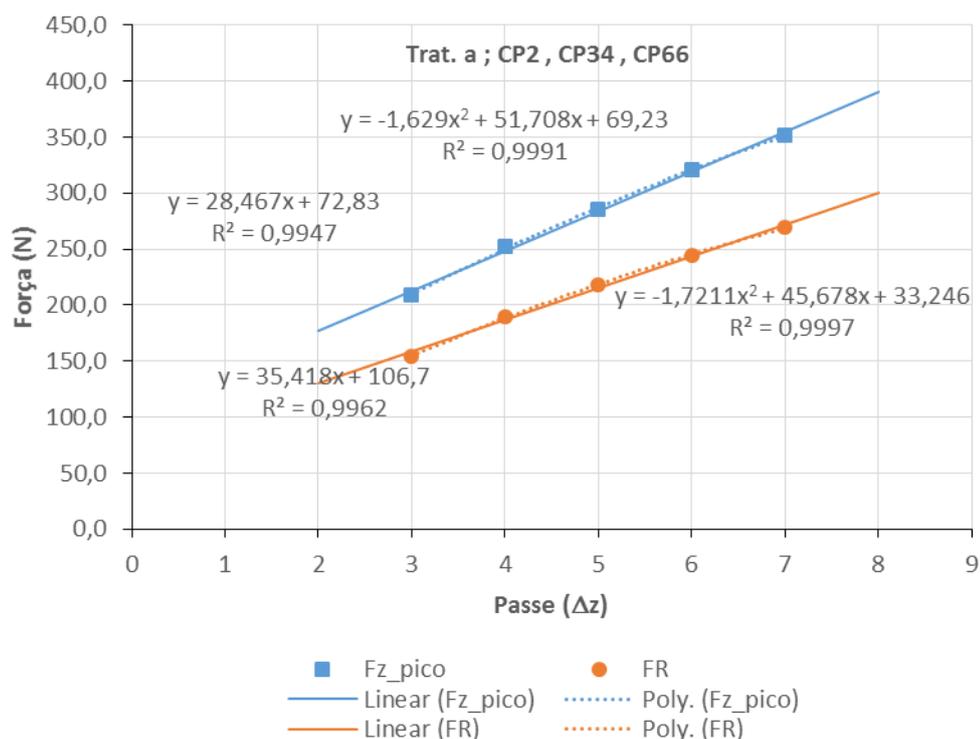
FIGURA 96 - COMPORTAMENTO DO ESFORÇO FZ AO LONGO DE 7 PASSES PARA O TRAT. "A", CP2.



FONTE: O autor.

A análise de regressão do modelo de forma simples, ou seja, considerando apenas a variação no incremento Δz dos passes de 3 a 7 pode ser observada no gráfico a seguir. Nesse caso, o coeficiente de determinação pode ser considerado ótimo, maior que 0,99.

FIGURA 97 - ANÁLISE DE REGRESSÃO DO MODELO PARA O TRAT. "A" NAS 3 REPETIÇÕES; CP2, CP34 E CP66.



FONTE: O autor.

5.5 EM RELAÇÃO AO ÂNGULO DE PAREDE $A=40^\circ$

No intuito de enxugar as informações repetitivas do documento, como por exemplo as tabelas que apresentam os valores obtidos das forças; Fz_pico, Fz_med, Fxy e FR para os testes cujo o ângulo de parede é $\alpha=40^\circ$, $\alpha=50^\circ$ e $\alpha=60^\circ$ as mesmas não estão contempladas nesse tópico 5.5 nem nos próximos 5.6 e 5.7, respectivamente. Entretanto, todos os dados podem ser encontrados no APÊNDICE B, para efeito de consulta.

Portanto, a partir desse momento as informações tecnológicas produzidas estão apresentadas de forma mais sucinta e objetiva em cada tópico, visando melhorar a descrição dos dados sem saturar com tabelas repetitivas. O mais importante é, de fato, a metodologia inovadora aplicada para manipulação e encadeamento dos resultados gerados.

Isto posto, a seguir tem-se os quadros com as médias dos esforços sob investigação e a análise de regressão para a combinação que contempla o ponto “acde”, ou seja, onde apenas o ângulo de parede α está ajustado para o menor nível e todos os demais posicionados no nível superior (+1), isto é, o tratamento +1, -1, +1, +1, +1, referente aos corpos de prova 30, 62 e 94.

TABELA 31- MÉDIAS DOS ESFORÇOS FZ_PICO, FR, FZ_MÉDIO E FXY PARA AS 3 REPETIÇÕES NO TRATAMENTO “ACDE”.

Passe	Corpo de Prova			Média
	30	62	94	
	Fz_pico			
1	513,68	490,24	524,42	509,45
2	774,42	792,00	795,90	787,44
3	988,28	1018,56	1029,30	1012,05
4	1158,20	1186,52	1204,10	1182,94
5	1303,72	1324,22	1350,58	1326,17
6	1404,30	1412,10	1448,24	1421,55
7	1466,80	1465,82	1508,78	1480,47

Passe	Corpo de Prova			Média
	30	62	94	
	FR			
1	412,29	411,52	433,46	419,09
2	595,03	601,73	617,13	604,63
3	741,70	750,15	768,24	753,36
4	875,33	882,73	902,91	886,99
5	980,27	987,26	1011,65	993,06
6	1053,58	1060,46	1088,55	1067,53
7	1096,83	1104,57	1133,41	1111,60

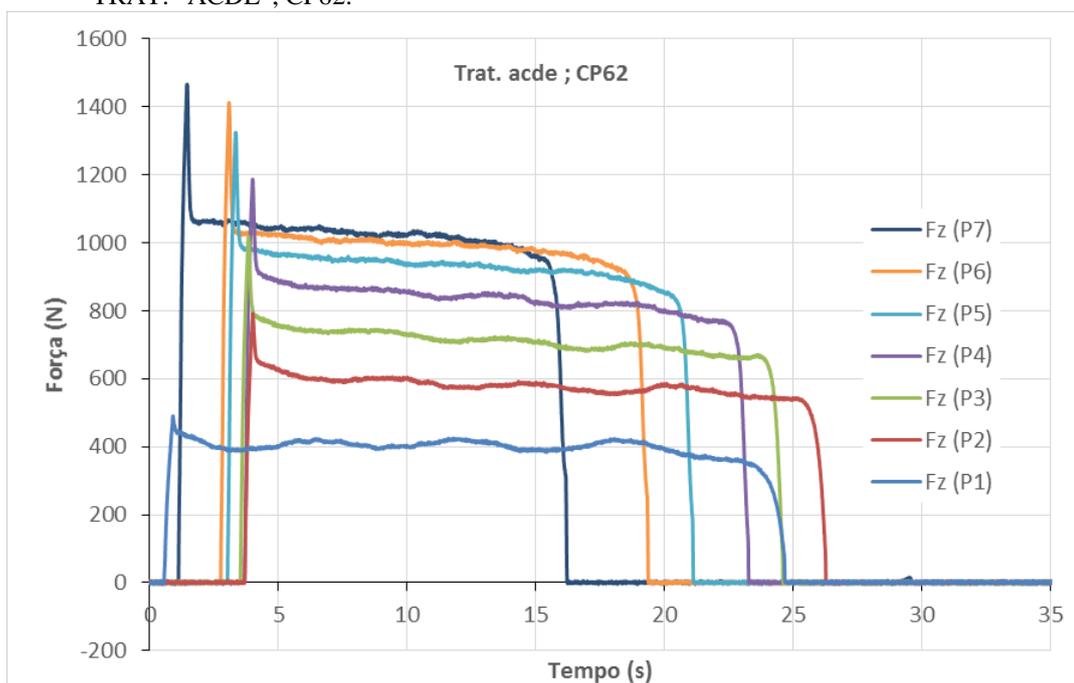
Passe	Corpo de Prova			Média
	30	62	94	
	Fz_médio			
1	400,27	399,72	421,15	407,04
2	571,14	577,95	593,91	581,00
3	701,59	710,34	729,46	713,79
4	827,13	835,14	855,90	839,39
5	922,74	930,03	954,09	935,62
6	983,06	991,35	1017,97	997,46
7	1016,16	1024,84	1052,40	1031,13

Passe	Corpo de Prova			Média
	30	62	94	
	Fxy			
1	98,84	97,84	102,59	99,76
2	166,92	167,49	167,69	167,37
3	240,63	241,13	241,01	240,92
4	286,45	285,92	287,57	286,65
5	330,88	331,25	336,38	332,84
6	379,00	376,56	385,60	380,39
7	412,86	412,05	420,78	415,23

FONTE: O autor.

No gráfico a seguir encontram-se as curvas referentes ao comportamento dos esforços em z para os 7 passes conduzidos no tratamento “acde” para o corpo de prova 62, o 2º do ciclo de repetição.

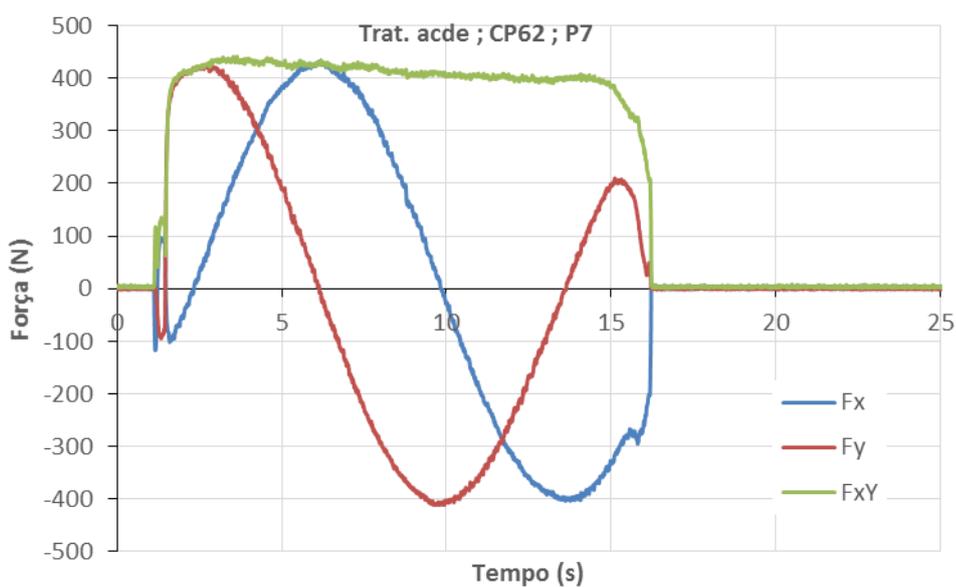
FIGURA 98 - COMPORTAMENTO DOS ESFORÇOS EM FZ NOS 7 PASSES PARA O TRAT. "ACDE", CP62.



FONTE: O autor.

No gráfico abaixo verificam-se as curvas F_x , F_y e F_{xy} que evidenciam o comportamento quase estável dos esforços no plano xy ao longo da trajetória circular realizada pelo punção.

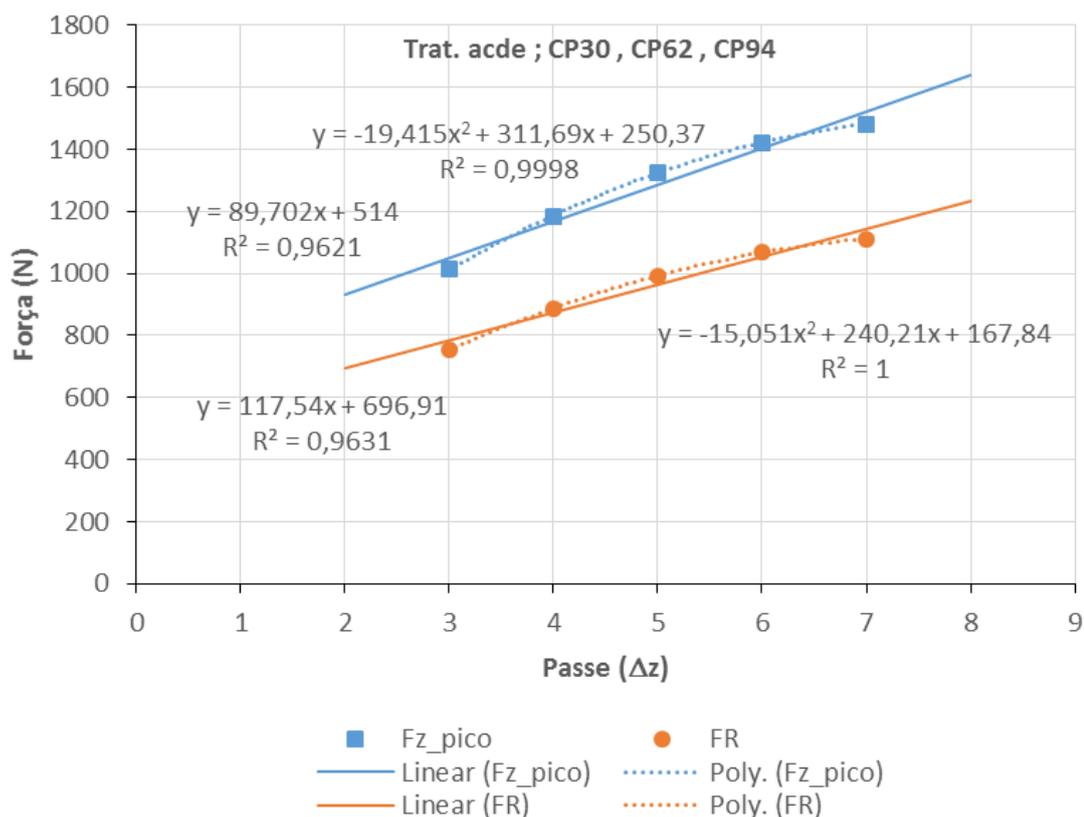
FIGURA 99 - COMPORTAMENTO DOS ESFORÇOS EM F_x , F_y E F_{xy} NO PASSE 7 PARA O TRAT. "ACDE", CP62.



FONTE: O autor.

A análise de regressão do modelo de forma simples, ou seja, considerando apenas a variação no incremento Δz dos passes de 3 a 7 pode ser observada no gráfico a seguir. O valor de R é muito bom, acima de 0,96 para todas as regressões.

FIGURA 100 - ANÁLISE DE REGRESSÃO DO MODELO PARA O TRAT. "ACDE" NAS 3 REP.:CP30, CP62 E CP94.



FONTE: O autor.

O tratamento onde todos os fatores estão ajustados para o nível baixo (-1) foi abordado no item 5.2 e, destarte, servem os mesmos apontamentos.

5.6 EM RELAÇÃO AO ÂNGULO DE PAREDE $A=50^\circ$

Nesse item 5.6, a maior parte dos resultados obtidos para o ponto central foi descrita no tópico 5.3 referente ao ponto central do fator diâmetro do punção $d_t=5\text{mm}$, outrossim, como todos os demais tópicos que perpassam os pontos centrais restantes, seja esse sob discussão $\alpha=50^\circ$ (5.6), sejam os próximos, espessura de parede $t=0,65\text{mm}$ (5.9), incremento $\Delta z=0,6\text{mm}$ (5.12) e avanço da ferramenta $f=175\text{mm/min}$ (5.15) são testes repetidos, ou seja, os corpos de prova de 97 a 106 têm a idêntica configuração fatorial, todos ajustados ao nível

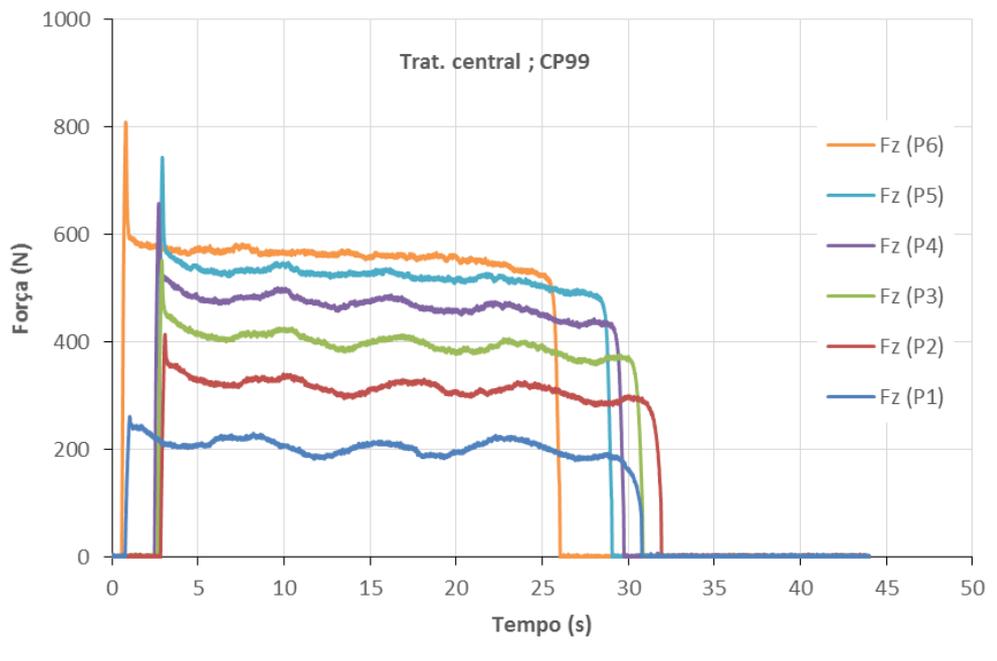
central (0,0,0,0,0), optou-se, a partir desse momento apresentar apenas os gráficos de comportamento das forças em; Fz_{med} e Fz_{pico} e Fx , Fy e Fxy , em cada tópico relacionado ao ponto central. Deste modo, tendo os resultados dos corpos de prova 97 e 98 descritos no item 5.4 tem-se, nesse item 5.6 apenas os resultados simplificados para os corpos de prova 99 e 100. Isto é, em cada tópico vindouro referente ao nível central estão apresentados 2 corpos de prova do conjunto de repetições, perfazendo, nesse aspecto, a apresentação dos resultados de todos os 10 corpos de prova testados no ponto central em 5 tópicos, 5.3, 5.6, 5.9, 5.12, 5.15, cada qual orientado pela metodologia inovadora de exposição dos resultados descrita no início desse capítulo.

À vista disto, a seguir encontram-se os resultados obtidos para os corpos de prova 99 e 100, sendo que cada análise contempla apenas 2 gráficos, o primeiro com a projeção da força Fz de todos os passes e o segundo com o comportamento das forças Fx , Fy e Fz no passe número 7. Conseqüentemente, com essa sistemática é possível acompanhar o comportamento de todos os testes ajustados para o ponto central e, excepcionalmente, caso observe-se algum ruído maior, aprofundar a investigação com análises adicionais num corpo de prova específico.

Outra característica relevante é que a média de todas as 10 repetições para as maiores forças envolvidas no processo de conformação incremental de chapas (ISF) Fz_{pico} e FR proporcionam, então, apenas uma análise de regressão, conforme item 5.3.

Na FIGURA 101 verifica-se o comportamento dos esforços em Fz nos 6 passes monitorados do teste com o corpo de prova 99, haja vista que ocorreu uma falha na aquisição dos dados no passe número 7, entretanto, essa falta não é significativa uma vez que para o cálculo das médias têm-se as outras 9 repetições.

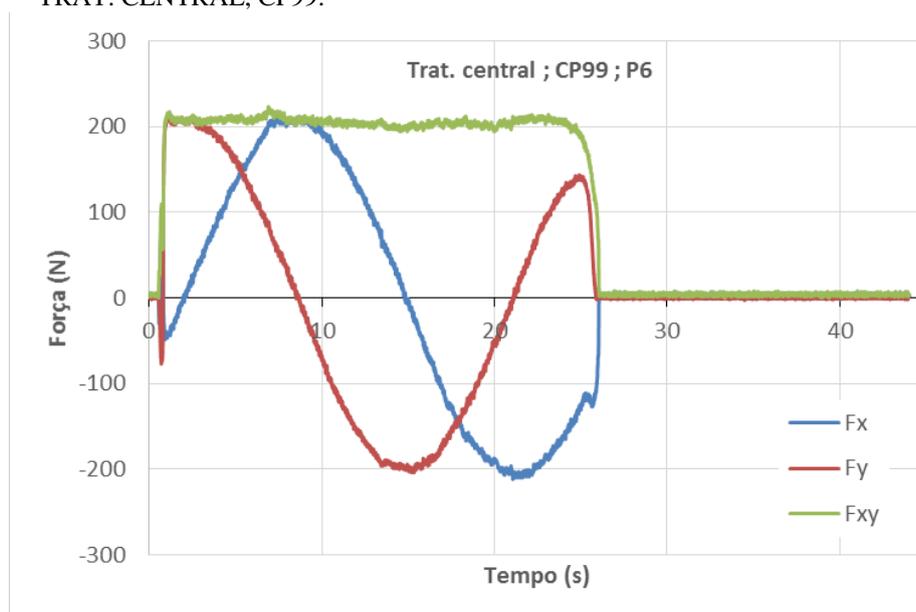
FIGURA 101 - COMPORTAMENTO DOS ESFORÇOS EM FZ NOS 6 PASSES PARA O TRAT. CENTRAL, CP99.



FONTE: O autor.

No gráfico abaixo encontra-se o comportamento dos esforços F_x , F_y e F_{xy} para o passe 6 do corpo de prova 99, uma vez que o passe 7 foi corrompido. As curvas estão padrão e similares aos demais testes sob esta mesma configuração.

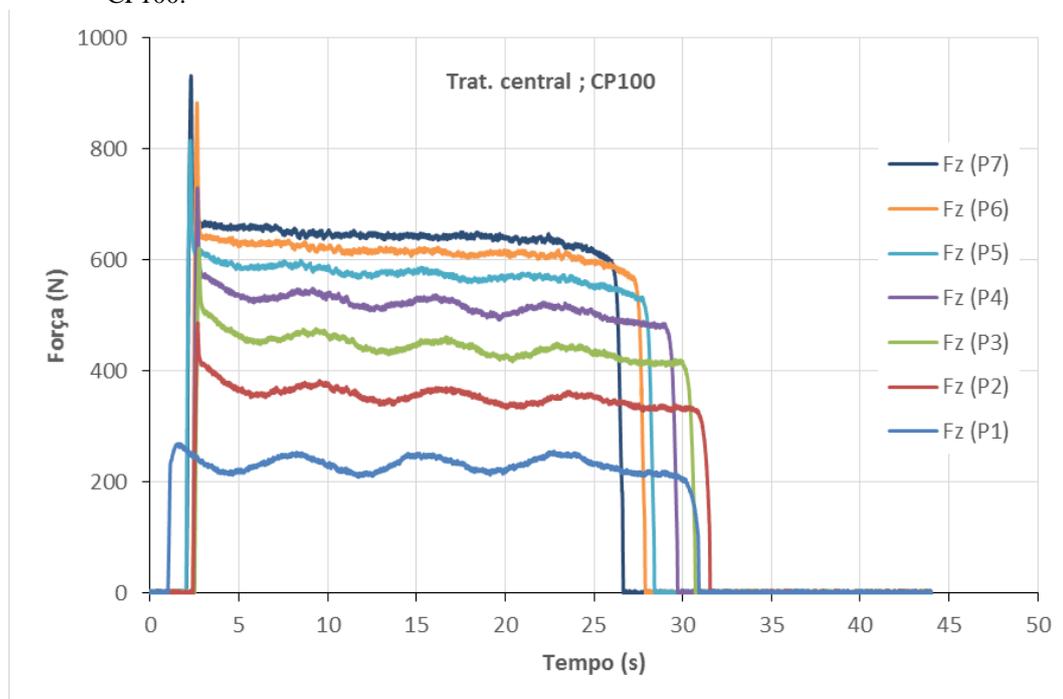
FIGURA 102 - COMPORTAMENTO DOS ESFORÇOS EM F_x , F_y E F_{xy} NO PASSE 6 PARA O TRAT. CENTRAL, CP99.



FONTE: O autor.

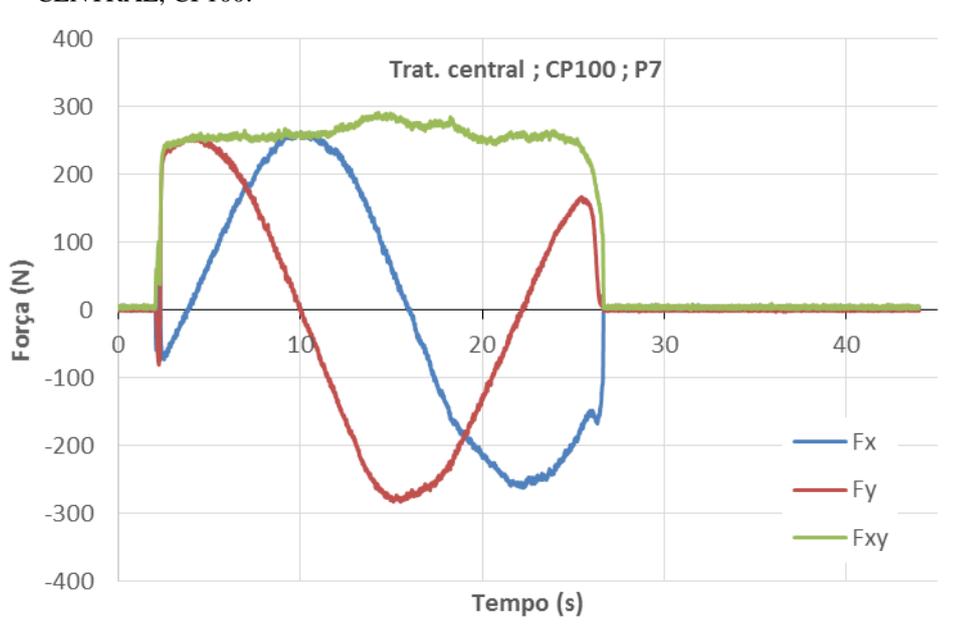
A seguir os gráficos referentes ao corpo de prova número 100, respectivamente figuras 103 e 104, comportamento nos passes em Fz e projeção em Fx, Fy e Fxy para o passe 7.

FIGURA 103 - COMPORTAMENTO DOS ESFORÇOS EM FZ NOS 7 PASSES PARA O TRAT. CENTRAL, CP100.



FONTE: O autor.

FIGURA 104 - COMPORTAMENTO DOS ESFORÇOS EM FX, FY E FXY NO PASSE 7 PARA O TRAT. CENTRAL, CP100.



FONTE: O autor.

O gráfico escalonado referente ao comportamento das forças em z do primeiro ao último passe tem comportamento muito similar ao traçado referente ao corpo de prova 97 apresentado na FIGURA 85. Sendo assim, esse tipo de gráfico não foi construído para os demais corpos de prova investigados no nível central, suavizando e otimizando o roteiro da apresentação dos resultados obtidos no experimento.

5.7 EM RELAÇÃO AO ÂNGULO DE PAREDE $A=60^\circ$

Analogamente ao tópico 5.5 nesse item também foram suprimidas as informações redundantes para otimizar a abordagem descritiva da pesquisa. Nesse espectro, a seguir verifica-se o quadro com as médias para os esforços investigados e a respectiva análise de regressão, ambos para o tratamento “b” -1, +1, -1, -1, -1, ou seja, os testes referentes aos corpos de prova 3, 35 e 67.

TABELA 32 - MÉDIAS DOS ESFORÇOS FZ_PICO, FR, FZ_MÉDIO E FXY PARA AS 3 REPETIÇÕES NO TRATAMENTO “B”.

Passe	Corpo de Prova			Média
	3	35	67	
	Fz_pico			
1	32,22	27,34	32,22	30,59
2	104,50	95,70	94,72	98,31
3	181,64	171,88	162,10	171,87
4	236,32	235,36	219,72	230,47
5	270,50	269,54	251,96	264,00
6	303,72	300,78	289,06	297,85
7	333,98	329,10	316,40	326,49

Passe	Corpo de Prova			Média
	3	35	67	
	FR			
1	17,52	13,04	14,01	14,86
2	81,57	76,77	75,75	78,03
3	137,91	133,66	130,25	133,94
4	176,43	174,29	168,86	173,19
5	204,40	203,27	198,91	202,19
6	228,64	227,01	225,54	227,06
7	248,37	246,67	247,28	247,44

Passe	Corpo de Prova			Média
	3	35	67	
	Fz_médio			
1	17,09	12,60	13,35	14,35
2	79,70	75,26	74,05	76,34
3	133,59	129,76	126,00	129,78
4	170,12	168,22	161,67	166,67
5	196,89	195,70	189,41	194,00
6	218,24	217,64	212,85	216,25
7	234,78	234,81	229,98	233,19

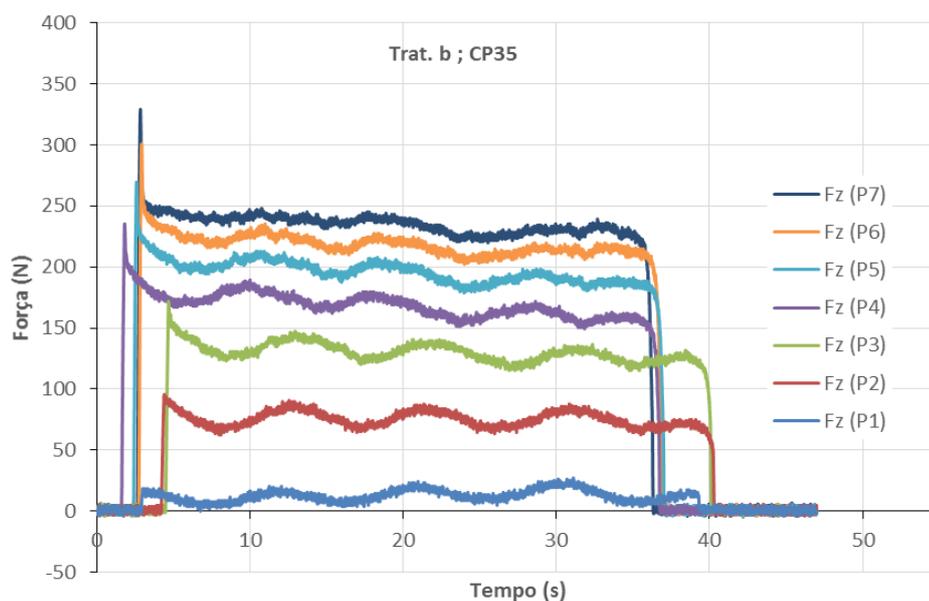
Passe	Corpo de Prova			Média
	3	35	67	
	Fxy			
1	3,82	3,38	4,25	3,82
2	17,38	15,13	15,94	16,15
3	34,26	32,06	33,01	33,11
4	46,78	45,59	48,75	47,04
5	54,90	54,98	60,74	56,87
6	68,16	64,53	74,57	69,09
7	81,05	75,54	90,87	82,49

FONTE: O autor.

A seguir os gráficos referentes ao corpo de prova número 35, o 2º do ciclo de repetição, respectivamente FIGURA 105 e FIGURA 106, comportamento nos passes em Fz e projeção em Fx, Fy e Fxy para o passe 7.

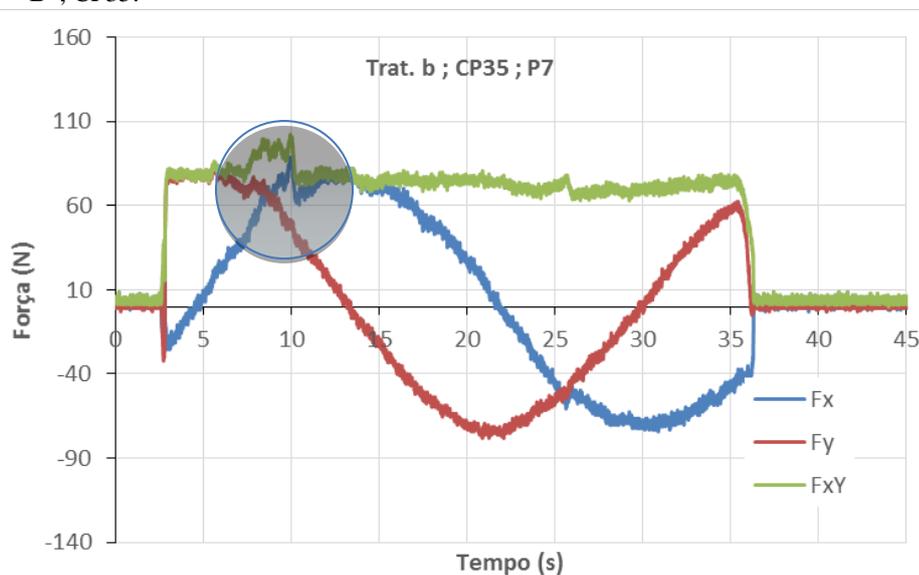
No gráfico da FIGURA 106, próximo aos 10s está destacada a região onde ocorre uma oscilação nas cargas sendo, muito provavelmente, decorrente da mudança de direção da ferramenta e do baixo nível de encrave da mesma na chapa.

FIGURA 105 - COMPORTAMENTO DOS ESFORÇOS EM FZ NOS 7 PASSES PARA O TRAT. "B", CP35.



FONTE: O autor.

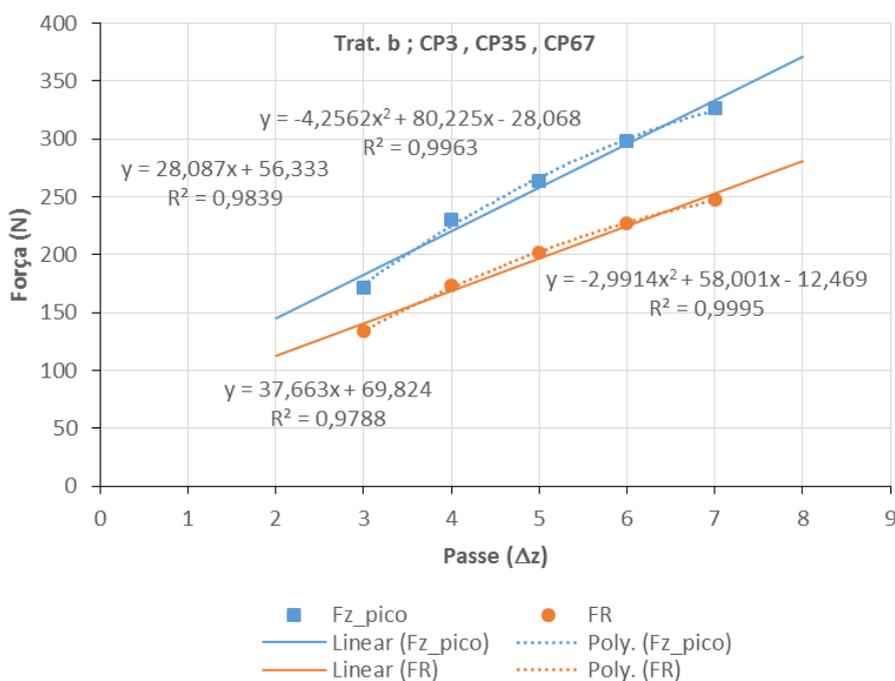
FIGURA 106 - COMPORTAMENTO DOS ESFORÇOS EM FX, FY E FXY NO PASSE 7 PARA O TRAT. "B", CP35.



FONTE: O autor.

A análise de regressão do modelo de forma simples, ou seja, considerando apenas a variação no incremento Δz dos passes de 3 a 7 pode ser observada no gráfico da próxima página; Na FIGURA 107 pode-se verificar a respectiva análise para a média dos 3 corpos de prova sob investigação nesse tópico.

FIGURA 107 - ANÁLISE DE REGRESSÃO DO MODELO PARA O TRAT. "B" NAS 3 REP.; CP3, CP35 E CP67.



FONTE: O autor.

O tratamento onde todos os fatores principais estão ajustados para o nível alto (+1) foi abordado no item 5.4 e, destarte, servem os mesmos apontamentos. Logo, não estão apresentados nesse tópico.

5.8 EM RELAÇÃO À ESPESSURA DE CHAPA T=0,43MM

O tratamento onde todos os fatores principais estão ajustados para o nível baixo (-1) foi abordado no item 5.2 e, destarte, servem os mesmos apontamentos. Logo, não estão apresentados nesse tópico.

Dessa maneira, na TABELA 33 tem-se os quadros com as médias dos esforços sob investigação para a combinação que contempla o ponto "abde", ou seja, onde apenas a espessura da chapa t está ajustada para o menor nível t=0,43mm e todos os demais

posicionados no nível alto (+1), isto é, o tratamento +1, +1, -1, +1, +1, referente aos testes dos corpos de prova 28, 60 e 92.

Uma evidência importante nesses quadros é a ordem de grandeza dos valores do teste 28 que está ligeiramente maior que as outras 2 repetições, isto é, aparentemente nesse ensaio pode ter ocorrido algum ruído na geração das informações. Todavia, o sinal ruído é avaliado no capítulo 6 justamente para verificar a integridade do modelo estatístico desenvolvido.

TABELA 33 - MÉDIAS DOS ESFORÇOS FZ_PICO, FR, FZ_MÉDIO E FXY PARA AS 3 REPETIÇÕES NO TRATAMENTO “ABDE”.

passe	Corpo de Prova			Média
	28	60	92	
	Fz_pico			
1	147,46	140,62	149,42	145,83
2	377,92	341,80	336,92	352,21
3	492,18	451,18	449,22	464,19
4	594,72	546,88	545,90	562,50
5	673,82	627,92	629,88	643,87
6	739,26	686,52	687,50	704,43
7	777,34	723,64	725,58	742,19

passe	Corpo de Prova			Média
	28	60	92	
	FR			
1	114,87	107,39	111,62	111,29
2	235,66	211,99	212,78	220,14
3	309,95	280,92	282,23	291,03
4	367,89	335,03	336,18	346,37
5	417,10	382,12	383,33	394,18
6	464,31	425,98	427,95	439,41
7	502,46	461,51	463,58	475,85

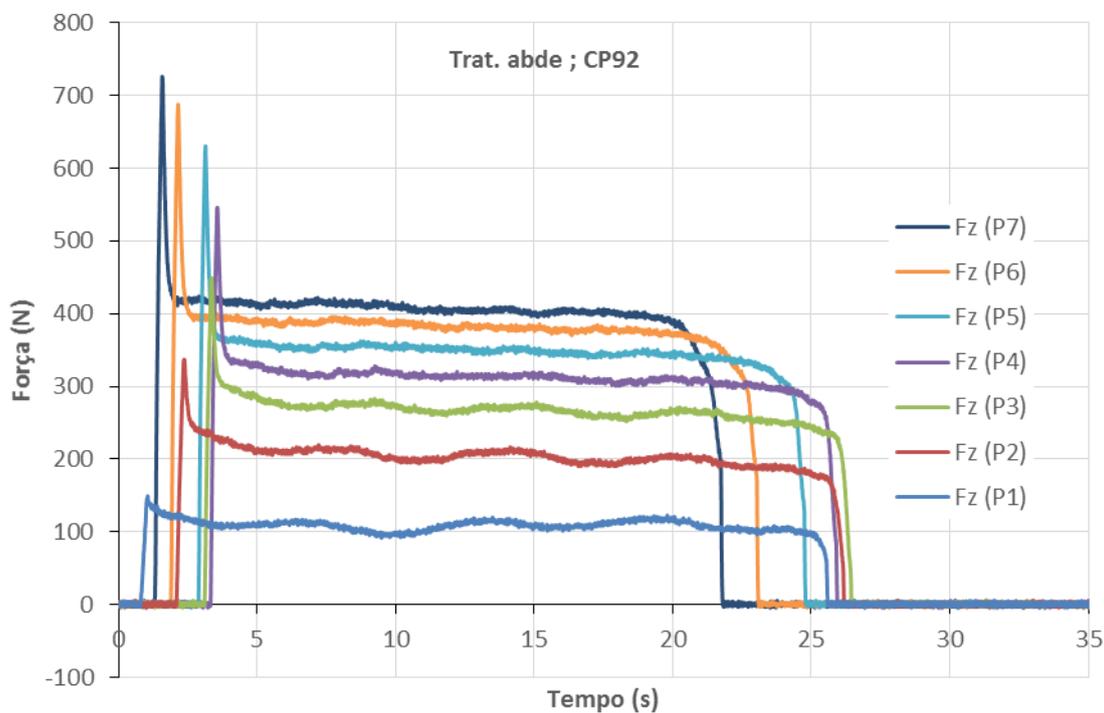
passe	Corpo de Prova			Média
	28	60	92	
	Fz_médio			
1	112,34	105,16	108,92	108,80
2	225,04	202,95	203,49	210,49
3	292,36	265,64	266,62	274,88
4	340,71	310,61	311,89	321,07
5	377,78	346,84	348,32	357,65
6	412,11	379,39	381,46	390,99
7	437,50	403,59	406,06	415,72

passe	Corpo de Prova			Média
	28	60	92	
	Fxy_médio			
1	23,98	21,77	24,44	23,39
2	69,98	61,25	62,17	64,46
3	102,92	91,38	92,56	95,62
4	138,78	125,57	125,46	129,94
5	176,79	160,36	160,05	165,73
6	213,89	193,71	193,98	200,53
7	247,11	223,85	223,66	231,54

FONTE: O autor.

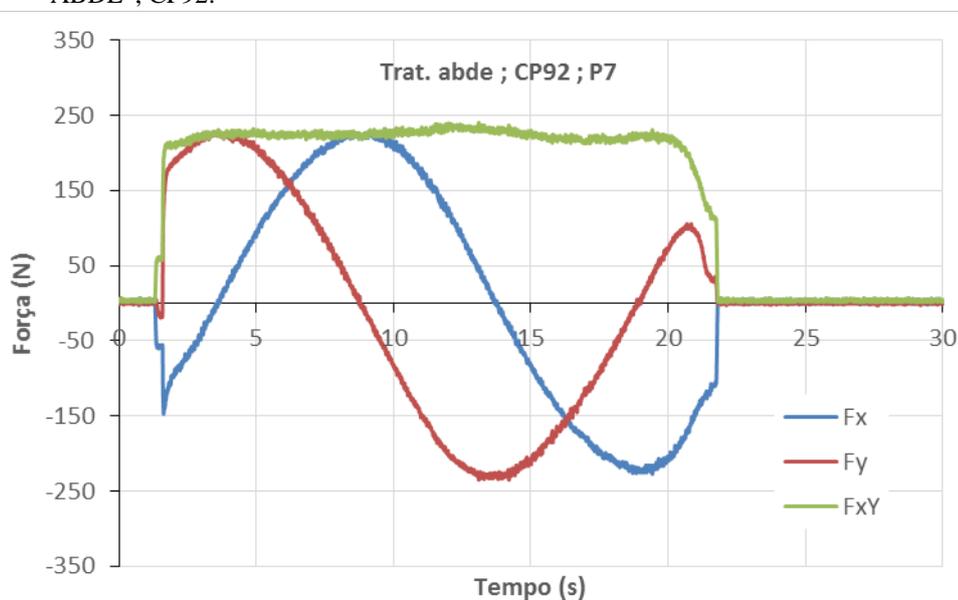
A seguir os gráficos referentes ao corpo de prova número 92, o 3º do ciclo de repetição, respectivamente FIGURA 108 e FIGURA 109, comportamento nos passes em Fz e projeção em Fx, Fy e Fxy para o passe 7. Todos com estabilidade ao longo da evolução.

FIGURA 108 - COMPORTAMENTO DOS ESFORÇOS EM FZ NOS 7 PASSES PARA O TRAT. "ABDE", CP92.



FONTE: O autor.

FIGURA 109 - COMPORTAMENTO DOS ESFORÇOS EM FX, FY E FX Y NO PASSE 7 PARA O TRAT. "ABDE", CP92.

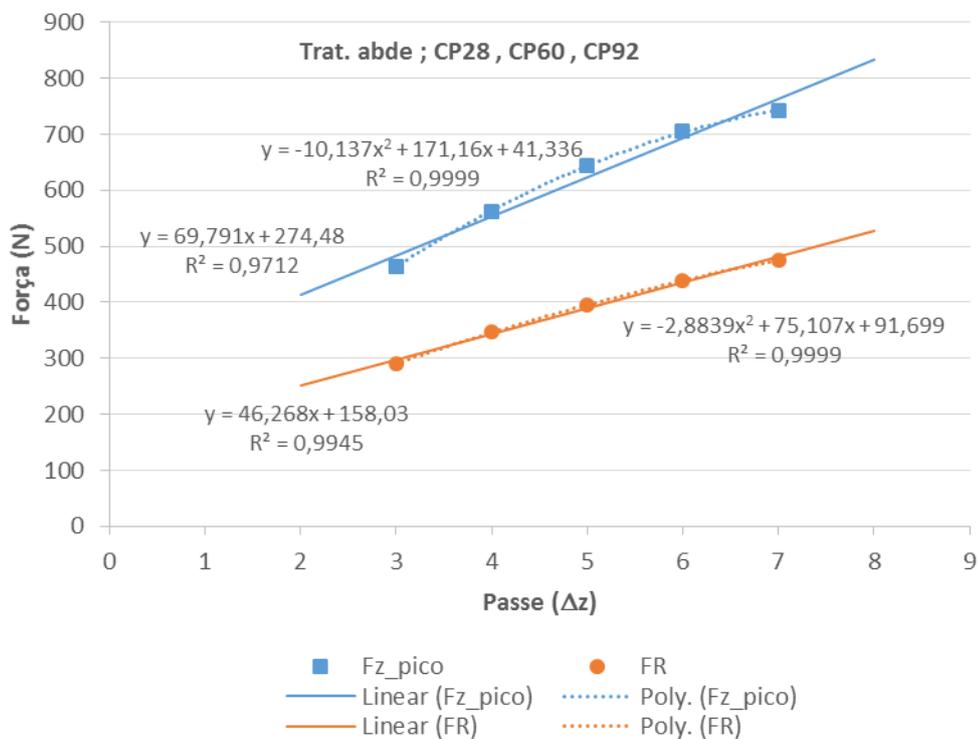


FONTE: O autor.

A análise de regressão do modelo de forma simples, ou seja, considerando apenas a variação no incremento Δz dos passes de 3 a 7 para os 3 ensaios pode ser observada no gráfico da FIGURA 110. Encontram-se excelentes valores de R^2 nessa relação, todos acima

de 0,97 e, dessa maneira, pode-se considerar a regressão linear como uma boa aproximação do modelo real.

FIGURA 110 - ANÁLISE DE REGRESSÃO DO MODELO PARA O TRAT. "ABDE" NAS 3 REP.; CP28, CP60 E CP92.

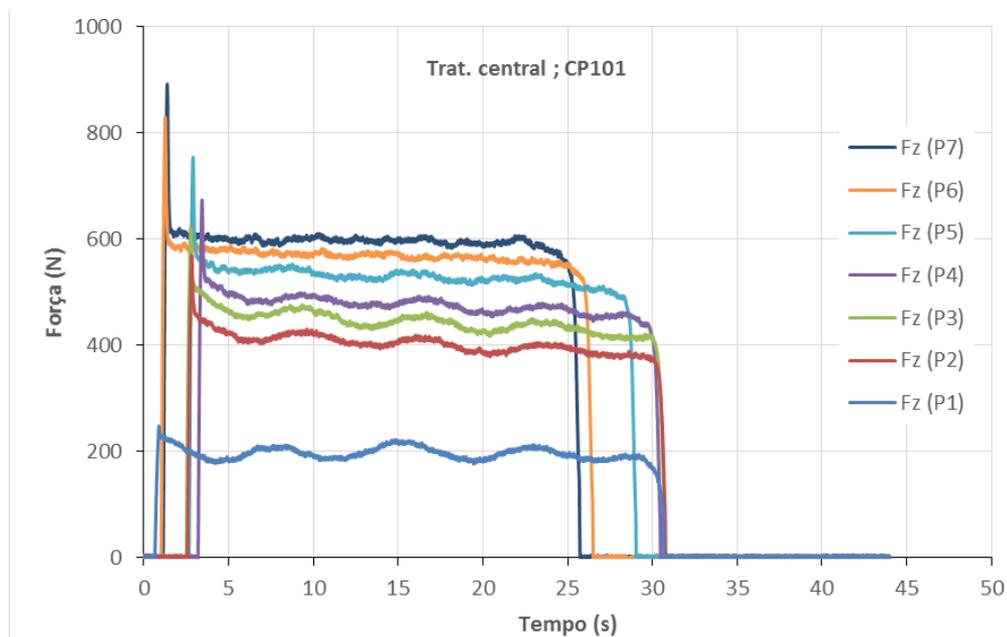


FONTE: O autor.

5.9 EM RELAÇÃO À ESPESSURA DE CHAPA T=0,65MM

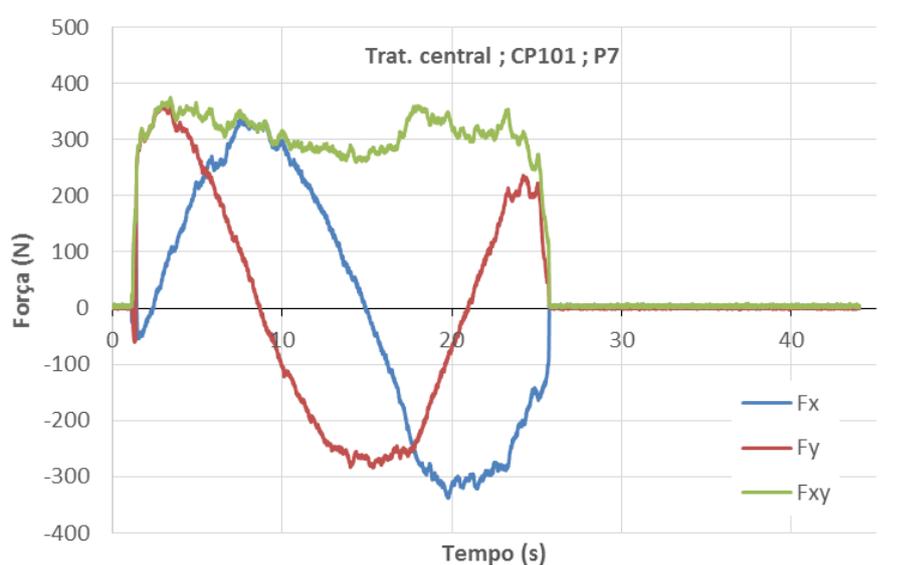
Dando sequência a estratégia enunciada anteriormente, nesse tópico 5.9 encontram-se as curvas de comportamento dos esforços nos 7 passes para o corpo de prova 101, FIGURA 111, assim como, a evolução das cargas F_x , F_y e F_{xy} apenas no passe 7 para o mesmo, FIGURA 112.

FIGURA 111 - COMPORTAMENTO DOS ESFORÇOS EM FZ NOS 7 PASSES PARA O TRAT. CENTRAL, CP101.



FONTE: O autor.

FIGURA 112 - COMPORTAMENTO DOS ESFORÇOS EM FX, FY E FXY NO PASSE 7 PARA O TRAT. CENTRAL, CP101.

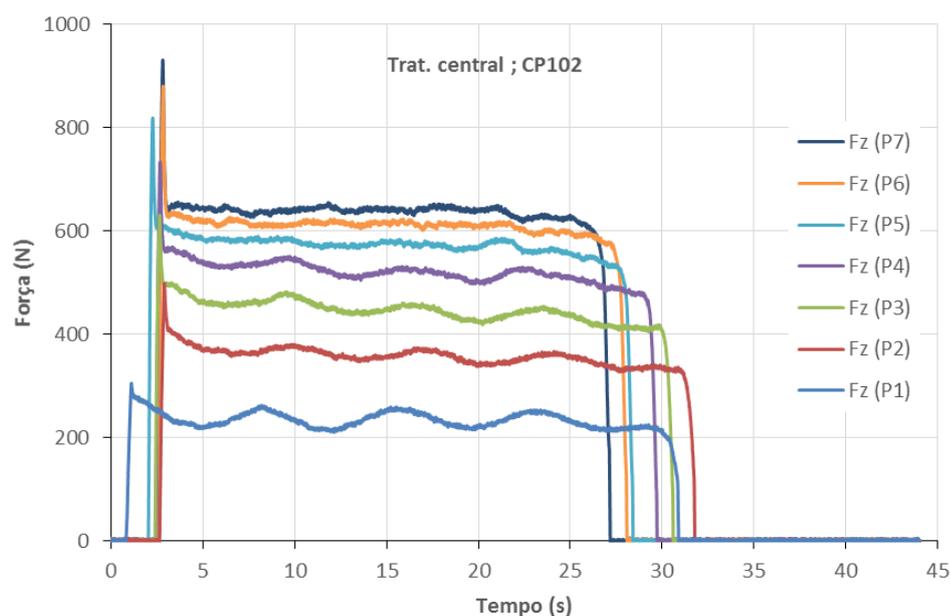


FONTE: O autor.

Registra-se que as diferenças constatadas para o início da curva de cada respectivo passe no gráfico da FIGURA 111, CP 101, estão apenas relacionadas ao momento que foi ativado o sistema de aquisição de forças do dinamômetro, ou seja, são apenas diferenças decorrentes da variação do tempo entre a liberação do sistema de aquisição de forças do dinamômetro e o efetivo início do processo de conformação incremental da chapa, chamado

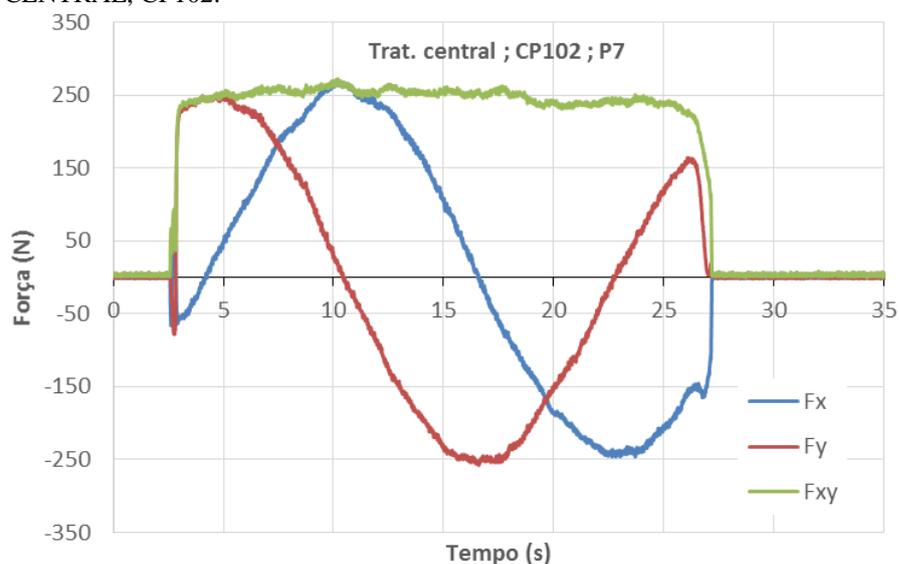
tempo de entrada e região onde não ocorre contato punção/chapa. No gráfico da FIGURA 112, referente ao 7º passe do teste do corpo de prova 101, verifica-se, novamente, uma leve vibração nas cargas. Possivelmente devido ao baixo nível dos fatores em uso. Por fim, nesse item, os gráficos referentes ao corpo de prova 102, isto é, os comportamentos em Fz para os 7 passes e a fotografia do passe 7 para as cargas Fx, Fy e Fxy.

FIGURA 113 - COMPORTAMENTO DOS ESFORÇOS EM FZ NOS 7 PASSES PARA O TRAT. CENTRAL, CP102.



FONTE: O autor.

FIGURA 114 - COMPORTAMENTO DOS ESFORÇOS EM FX, FY E FXY NO PASSE 7 PARA O TRAT. CENTRAL, CP102.



FONTE: O autor.

5.10 EM RELAÇÃO À ESPESSURA DE CHAPA T=0,80MM

Na TABELA 34 tem-se o quadro com as médias para os esforços investigados nesse tópico e, na sequência, a respectiva análise de regressão, ambos para o tratamento “c”, -1, -1, +1, -1, -1, ou seja, os testes referentes aos corpos de prova 5, 37 e 69.

TABELA 34 - MÉDIAS DOS ESFORÇOS FZ_PICO, FR, FZ_MÉDIO E FXY PARA AS 3 REPETIÇÕES NO TRATAMENTO “C”.

Passe	Corpo de Prova			Média
	5	37	69	
	Fz_pico			
1	267,58	314,46	266,60	282,88
2	415,04	421,88	418,94	418,62
3	507,82	506,84	501,96	505,54
4	624,02	607,42	619,14	616,86
5	707,04	698,24	706,06	703,78
6	765,62	762,70	762,70	763,67
7	829,10	822,26	824,22	825,19

Passe	Corpo de Prova			Média
	5	37	69	
	FR			
1	226,47	239,73	222,70	229,64
2	343,57	340,14	343,13	342,28
3	426,03	427,09	430,79	427,97
4	517,03	520,72	526,13	521,29
5	589,39	594,47	596,99	593,62
6	646,56	651,34	653,49	650,46
7	706,68	704,53	712,56	707,93

Passe	Corpo de Prova			Média
	5	37	69	
	Fz_médio			
1	221,80	232,52	217,80	224,04
2	328,90	325,47	326,76	327,04
3	401,07	402,53	402,12	401,91
4	478,67	482,79	483,15	481,53
5	542,89	545,61	544,28	544,26
6	590,28	592,45	590,66	591,13
7	640,75	637,63	642,78	640,39

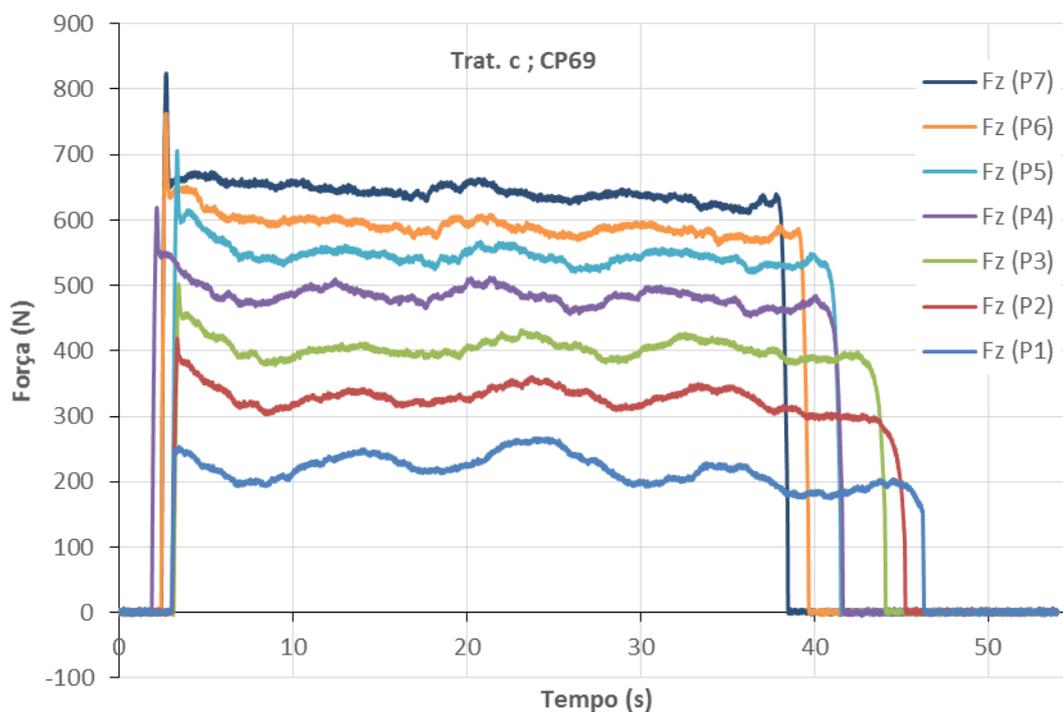
Passe	Corpo de Prova			Média
	5	37	69	
	Fxy			
1	45,79	58,34	46,46	50,20
2	99,33	98,80	104,71	100,95
3	143,69	142,75	154,52	146,99
4	195,43	195,10	208,27	199,60
5	229,46	236,02	245,25	236,91
6	263,83	270,62	279,60	271,35
7	298,06	299,64	307,54	301,75

FONTE: O autor.

Desse modo, a seguir esboçam-se os gráficos referentes ao corpo de prova número 69, o 3º do bloco de repetição, respectivamente FIGURA 115 e FIGURA 116, comportamento nos passes em Fz e projeção em Fx, Fy e Fxy para o passe 7.

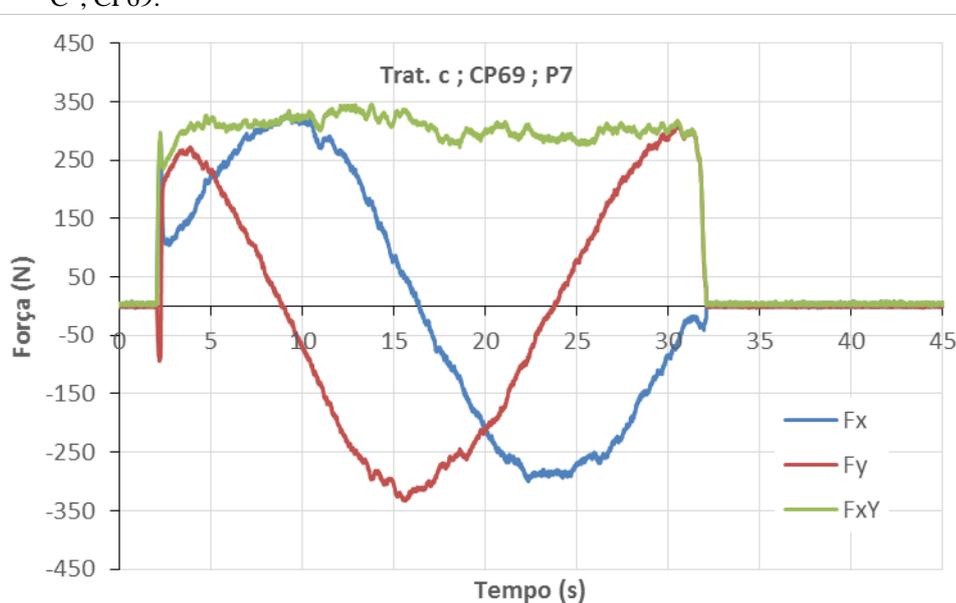
Nessa condição surgem indícios de aumento no nível de vibração do punção pois, como o incremento em z, Δz , está ajustado para o ponto inferior 0,4mm, assim como todos os demais fatores, com exceção exatamente da espessura da chapa que está em $t=0,8\text{mm}$, ocorre a tendência de oscilação nos valores registrados dos esforços Fx e Fy, justamente decorrente desse pouco engajamento da ferramenta no processo. Esse fenômeno pode ser observado na FIGURA 116, teste referente ao passe 7 do corpo de prova 69.

FIGURA 115 - COMPORTAMENTO DOS ESFORÇOS EM FZ NOS 7 PASSES PARA O TRAT. "C", CP69.



FONTE: O autor.

FIGURA 116 - COMPORTAMENTO DOS ESFORÇOS EM FX, FY E FXY NO PASSE 7 PARA O TRAT. "C", CP69.

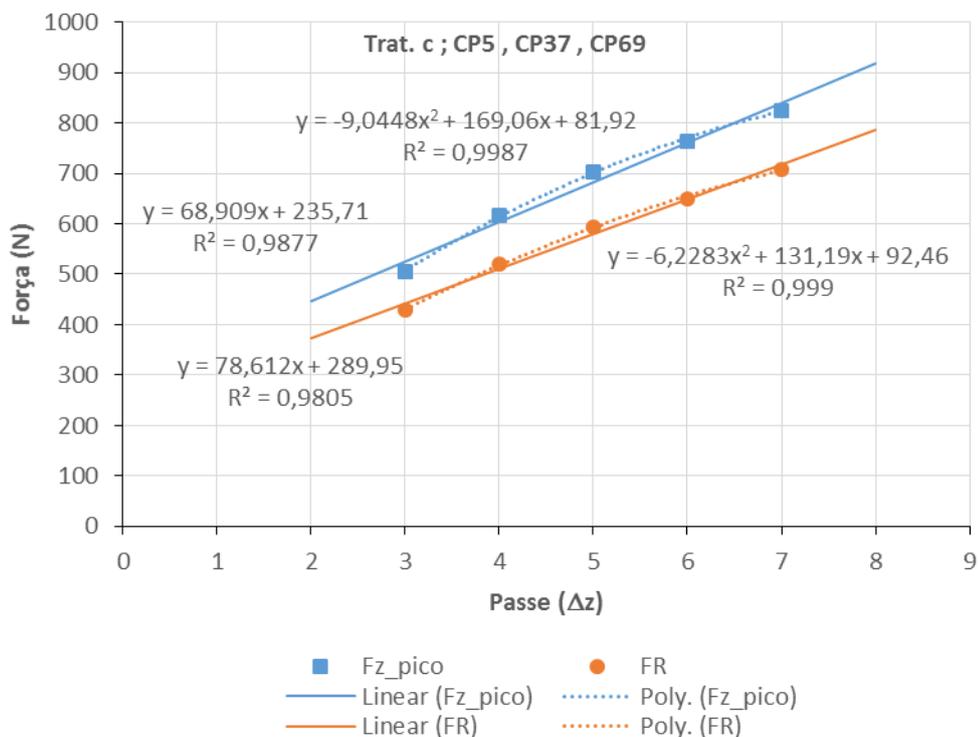


FONTE: O autor.

A análise de regressão do modelo de forma simples, ou seja, considerando apenas a variação no incremento Δz dos passes de 3 a 7 para os 3 ensaios pode ser observada no gráfico da FIGURA 117. Adicionalmente, registra-se o excelente nível de R^2 , isto é, o

ajustamento do modelo estatístico linear pode ser considerado muito bom pois, em ambos os casos o valor está acima de 0.99.

FIGURA 117 - ANÁLISE DE REGRESSÃO DO MODELO PARA O TRAT. “C” NAS 3 REP.; CP5, CP37 E CP69.



FONTE: O autor.

O tratamento onde todos os fatores principais estão ajustados para o nível alto (+1) foi abordado no item 5.4 e, destarte, servem os mesmos apontamentos. Logo, não estão apresentados nesse tópico.

5.11 EM RELAÇÃO AO INCREMENTO $\Delta Z=0,4MM$

O tratamento onde todos os fatores principais estão ajustados para o nível baixo (-1) foi abordado no item 5.2 e, destarte, servem os mesmos apontamentos. Logo, não estão apresentados nesse tópico.

Desse modo, na TABELA 35 tem-se os quadros com as médias dos esforços sob investigação e, na sequência, a devida análise de regressão para a combinação que contempla o ponto “abce”, ou seja, onde apenas o incremento em z, Δz , está ajustado para o menor nível e todos os demais posicionados no nível superior (+1), isto é, o tratamento +1, +1, +1, -1, +1, referente aos testes dos corpos de prova 24, 56 e 88.

Nesse aspecto, a seguir encontram-se também os gráficos referentes ao corpo de prova número 24, respectivamente FIGURA 118 e FIGURA 119, comportamento nos passes em Fz e projeção em Fx, Fy e Fxy para o passe 7.

TABELA 35 - MÉDIAS DOS ESFORÇOS FZ_PICO, FR, FZ_MÉDIO E FXY PARA AS 3 REPETIÇÕES NO TRATAMENTO “ABCE”.

Passe	Corpo de Prova			Média
	24	56	88	
	Fz_pico			
1	342,78	349,60	357,42	349,93
2	472,66	479,50	462,90	471,69
3	617,18	619,14	597,66	611,33
4	747,08	750,98	724,60	740,89
5	851,56	846,68	819,34	839,19
6	947,26	938,48	909,18	931,64
7	1037,10	1025,40	992,18	1018,23

Passe	Corpo de Prova			Média
	24	56	88	
	FR			
1	283,75	274,97	272,02	276,91
2	385,70	381,35	374,87	380,64
3	499,03	490,36	481,96	490,45
4	601,01	591,82	578,51	590,45
5	686,34	677,14	661,12	674,87
6	758,80	749,73	733,23	747,25
7	821,69	813,79	796,84	810,77

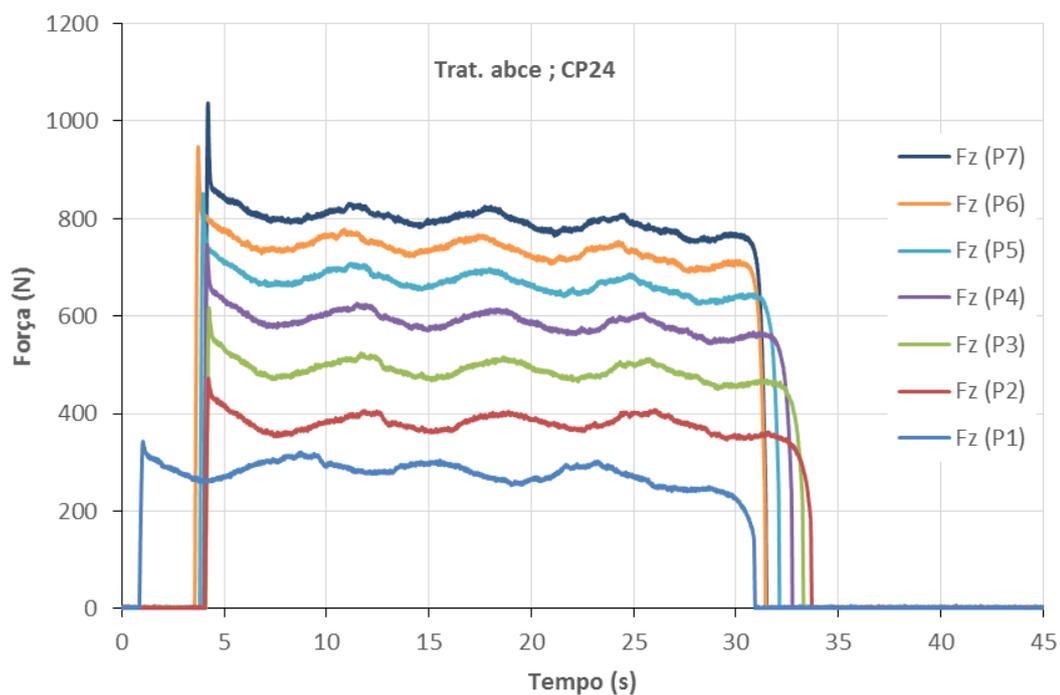
Passe	Corpo de Prova			Média
	24	56	88	
	Fz_médio			
1	279,04	270,48	267,59	272,37
2	378,24	374,12	367,46	373,27
3	487,44	479,89	471,18	479,50
4	586,17	578,06	564,37	576,20
5	667,90	659,30	643,36	656,85
6	736,21	727,66	711,14	725,00
7	794,61	786,81	770,18	783,87

Passe	Corpo de Prova			Média
	24	56	88	
	Fxy			
1	51,52	49,48	48,86	49,95
2	75,51	73,90	74,18	74,53
3	106,92	100,78	101,36	103,02
4	132,74	126,89	127,11	128,91
5	158,05	154,41	152,21	154,89
6	183,79	180,57	178,62	180,99
7	209,22	207,79	204,39	207,13

FONTE: O autor.

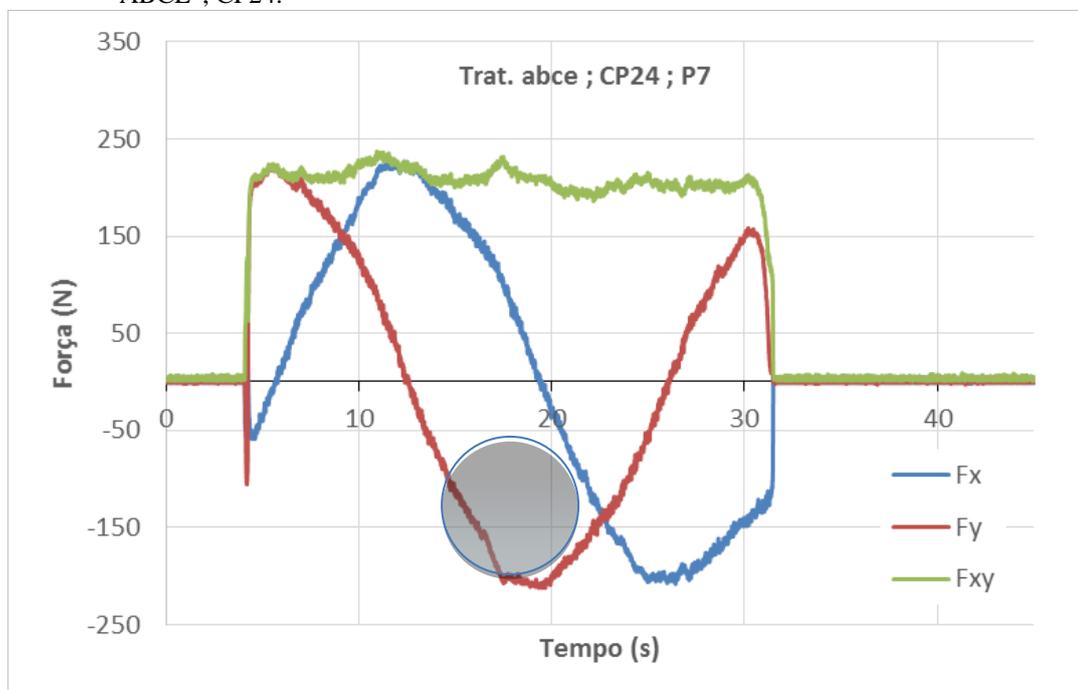
O gráfico que traz as curvas dos 7 passes em z para o CP 24 está bastante estável e delineado com razoável exatidão, isto é, o mesmo representa nitidamente a trajetória circular e as respectivas coordenadas de mudança de direção do punção. Entretanto, verifica-se uma tendência à vibração no gráfico da FIGURA 119, provavelmente do leve excesso de velocidade do punção em relação ao engajamento da ponta esferoidal da ferramenta na chapa, em t=20s aproximadamente.

FIGURA 118 - COMPORTAMENTO DOS ESFORÇOS EM FZ NOS 7 PASSES PARA O TRAT. "ABCE", CP24.



FONTE: O autor.

FIGURA 119 - COMPORTAMENTO DOS ESFORÇOS EM FX, FY E FXY NO PASSE 7 PARA O TRAT. "ABCE", CP24.

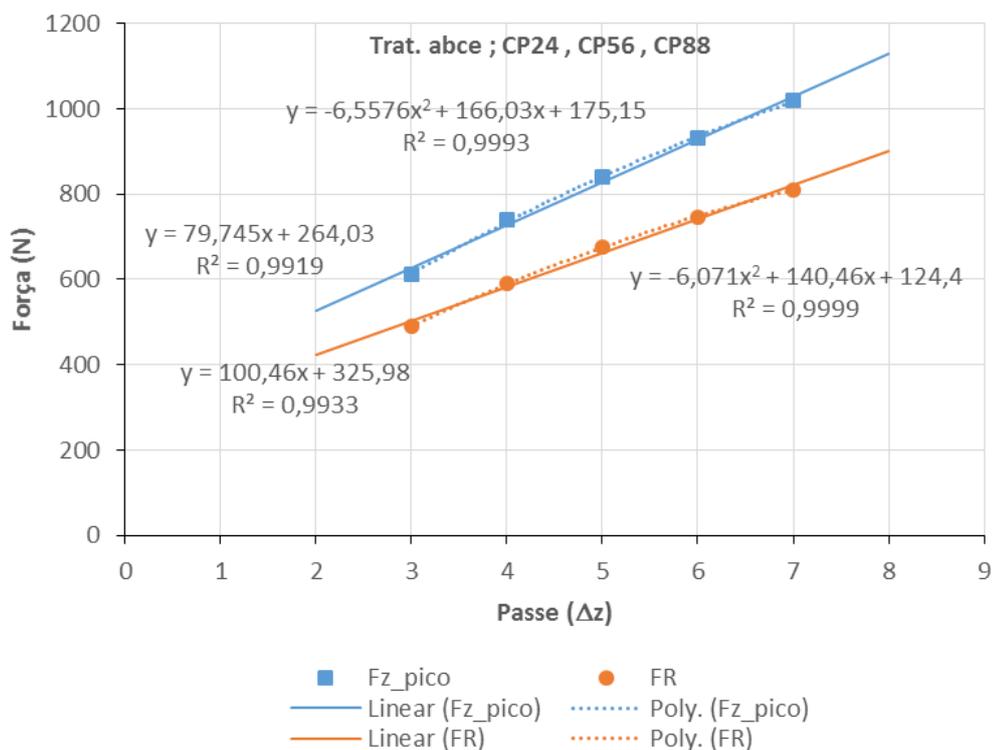


FONTE: O autor.

A análise de regressão do modelo de forma simples, ou seja, considerando apenas a variação no incremento Δz dos passes de 3 a 7 para os 3 ensaios pode ser observada no

gráfico da FIGURA 120. Destaca-se o ótimo valor para R^2 , maior que 0,99 para todos os casos.

FIGURA 120 - ANÁLISE DE REGRESSÃO DO MODELO PARA O TRAT. "ABCE" NAS 3 REP.; CP24, CP56 E CP88.

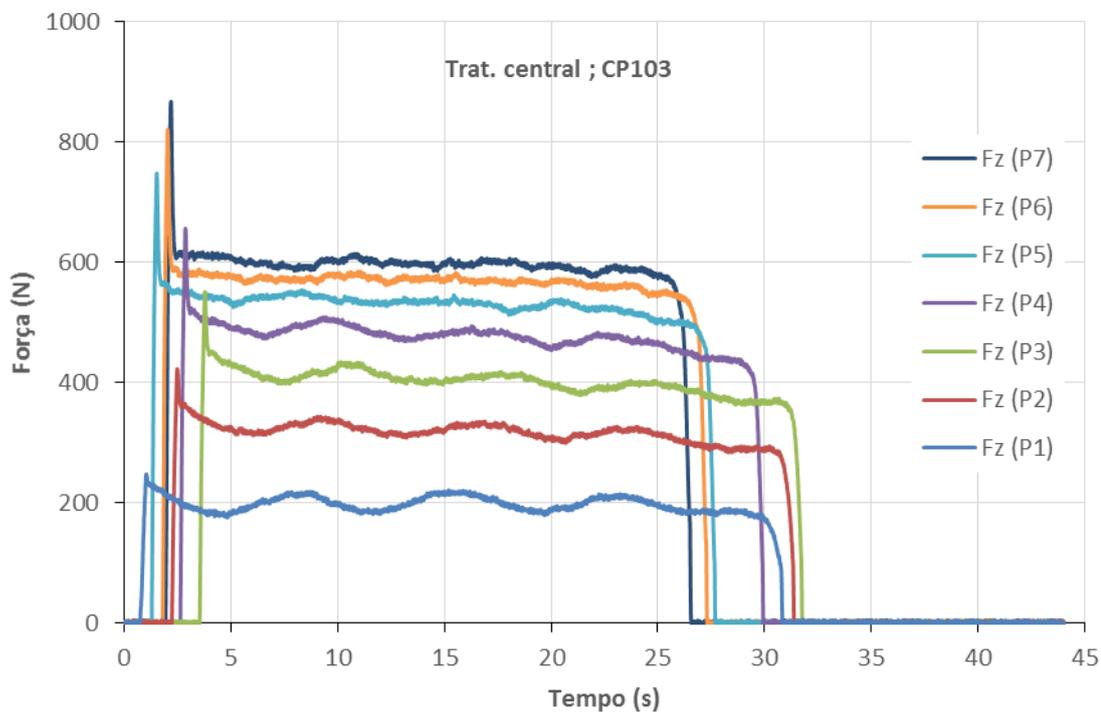


FONTE: O autor.

5.12 EM RELAÇÃO AO INCREMENTO $\Delta Z=0,6\text{MM}$

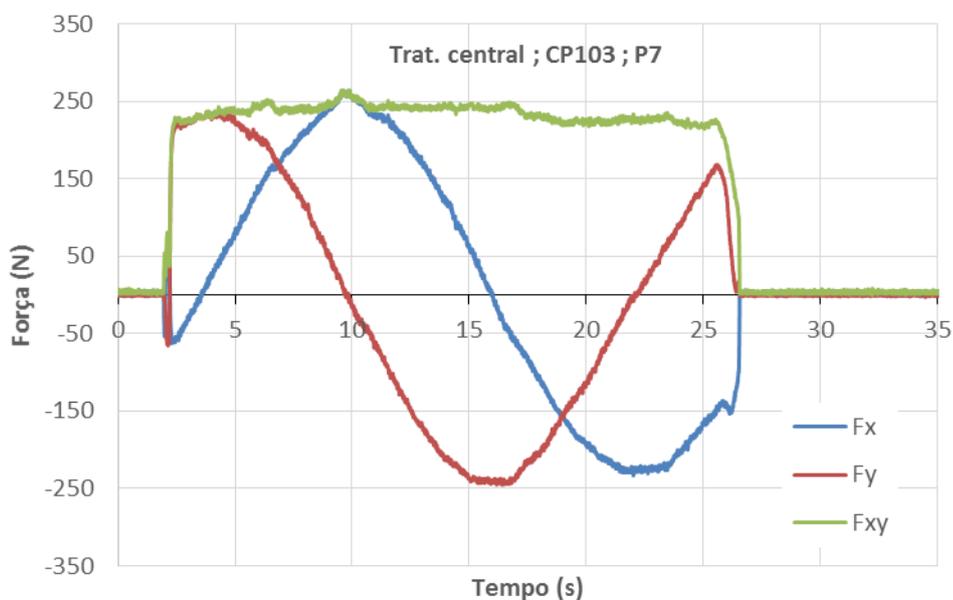
Nesse item estão os gráficos dos corpos de prova testados no nível intermediário, sendo eles, os elementos CP103 e CP 104. Outrossim, não se verificou eventos especiais, apenas uma leve vibração no decorrer dos esforços monitorados no eixo z, todavia, nada marcante que induza a evidências distintas. A seguir encontra-se a FIGURA 121 e FIGURA 122, referentes ao CP103.

FIGURA 121 - COMPORTAMENTO DOS ESFORÇOS EM FZ NOS 7 PASSES PARA O TRAT. CENTRAL, CP103.



FONTE: O autor.

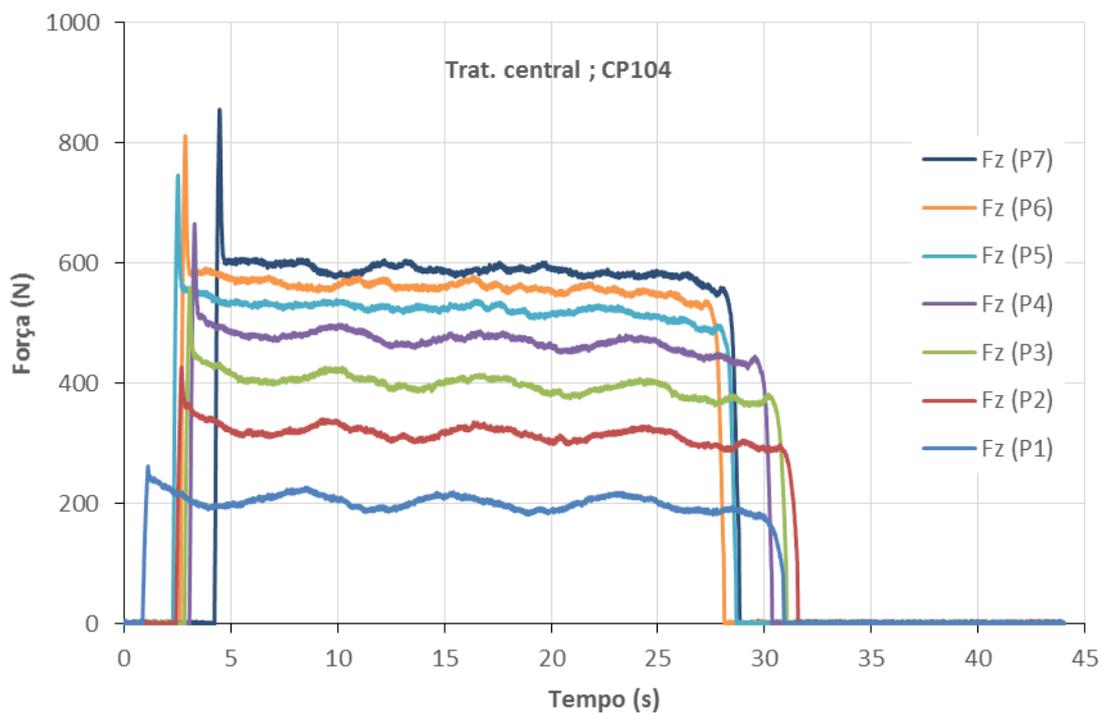
FIGURA 122 - COMPORTAMENTO DOS ESFORÇOS EM FX, FY E FXY NO PASSE 7 PARA O TRAT. CENTRAL, CP103.



FONTE: O autor.

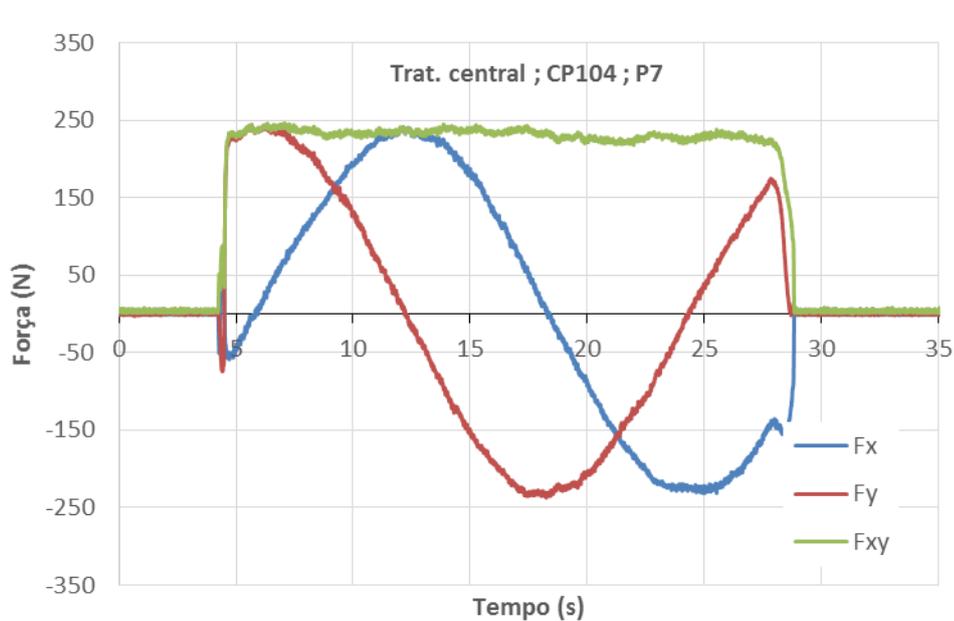
Em relação aos gráficos do corpo de prova 104 tem-se, semelhantemente, as mesmas observações do CP 103. A FIGURA 123 e FIGURA 124, referem-se ao CP104.

FIGURA 123 - COMPORTAMENTO DOS ESFORÇOS EM FZ NOS 7 PASSES PARA O TRAT. CENTRAL, CP104.



FONTE: O autor.

FIGURA 124 - COMPORTAMENTO DOS ESFORÇOS EM FX, FY E FXY NO PASSE 7 PARA O TRAT. CENTRAL, CP104.



FONTE: O autor.

5.13 EM RELAÇÃO AO INCREMENTO $\Delta Z=0,8\text{MM}$

Na TABELA 36 verifica-se o quadro com as médias para os esforços investigados e, na sequência, a respectiva análise de regressão, ambos para o tratamento “d”, -1, -1, -1, +1, -1, ou seja, os testes referentes aos corpos de prova 9, 41 e 73.

Na FIGURA 125 que traz as curvas em Fz para todos os passes tem-se uma significativa aproximação dos 3 últimos patamares de esforços registrados, isto é, a partir da profundidade $4 \times \Delta z$, equivalente a 3,2mm de avanço em z até o patamar final de 5,6mm as curvas tendem a se amontoar. Assim sendo, essa evidência induz que a partir de um nível de deformação em z da chapa as cargas, Fz_pico e FR, crescem de maneira bem menos intensa do que no início do processo de conformação incremental.

Outro aspecto interessante foi revelado pela FIGURA 125, onde, claramente as curvas apresentam comportamento estável, mesmo em patamares de esforços menores que 300N, ou seja, nessa combinação com máximo incremento em z, z, o punção tende a permanecer rígido nos pontos de mudança de direção em x ou em y durante o percurso de conformação da chapa. Por conseguinte e, aparentemente, o engajamento da ferramenta na chapa deve ser o responsável pela maior robustez da dinâmica de deformação.

TABELA 36 - MÉDIAS DOS ESFORÇOS FZ_PICO, FR, FZ_MÉDIO E FXY PARA AS 3 REPETIÇÕES NO TRATAMENTO “D”.

Passe	Corpo de Prova			Média
	9	41	73	
	Fz_pico			
1	103,52	81,06	99,60	94,73
2	259,76	244,14	269,54	257,81
3	349,60	346,68	357,42	351,23
4	409,18	404,30	409,18	407,55
5	455,08	457,04	451,18	454,43
6	484,38	497,08	486,32	489,26
7	503,90	515,62	500,98	506,83

Passe	Corpo de Prova			Média
	9	41	73	
	FR			
1	81,37	62,20	80,09	74,56
2	178,26	170,99	183,01	177,42
3	235,21	233,91	240,36	236,49
4	283,62	284,59	287,13	285,11
5	318,95	323,79	321,06	321,27
6	339,63	348,80	340,69	343,04
7	347,86	360,68	347,34	351,96

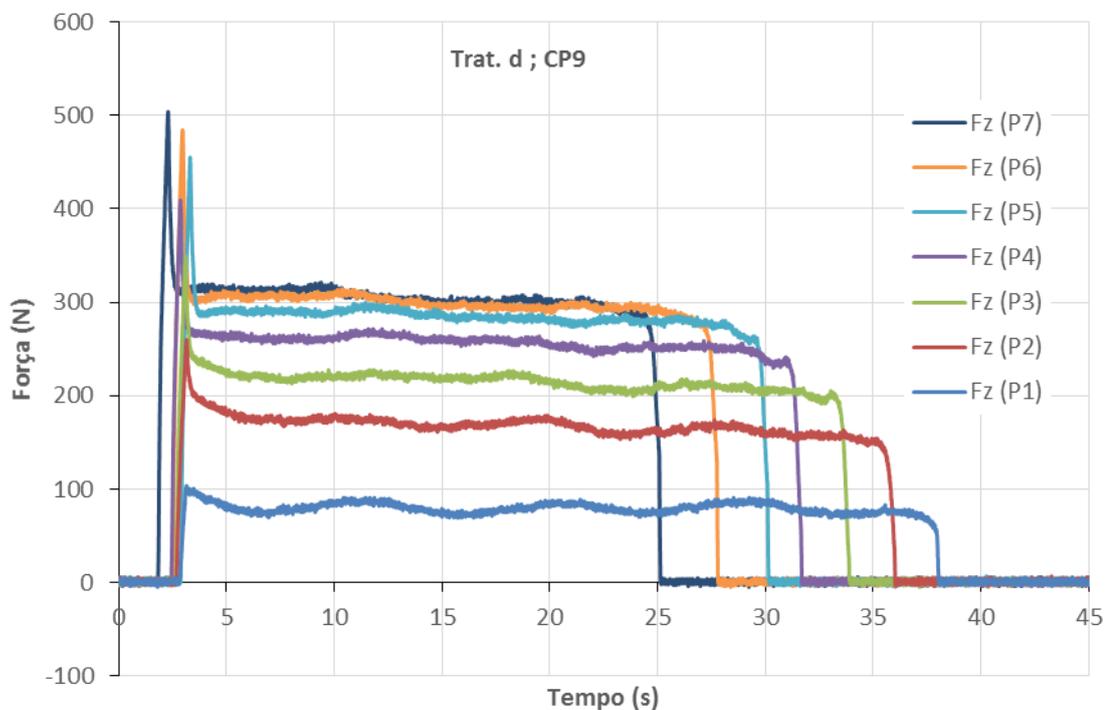
Passe	Corpo de Prova			Média
	9	41	73	
	Fz_médio			
1	79,38	60,89	77,83	72,70
2	167,75	159,63	170,64	166,01
3	215,05	211,66	218,75	215,15
4	257,17	252,51	259,27	256,32
5	284,76	279,16	283,68	282,53
6	299,31	292,94	296,49	296,25
7	305,35	297,48	300,41	301,08

Passe	Corpo de Prova			Média
	9	41	73	
	Fxy			
1	17,89	12,68	18,90	16,49
2	60,32	61,27	66,12	62,57
3	95,28	99,56	99,60	98,14
4	119,60	131,25	123,38	124,75
5	143,66	164,03	150,36	152,69
6	160,50	189,34	167,80	172,55
7	166,64	203,96	174,36	181,65

FONTE: O autor.

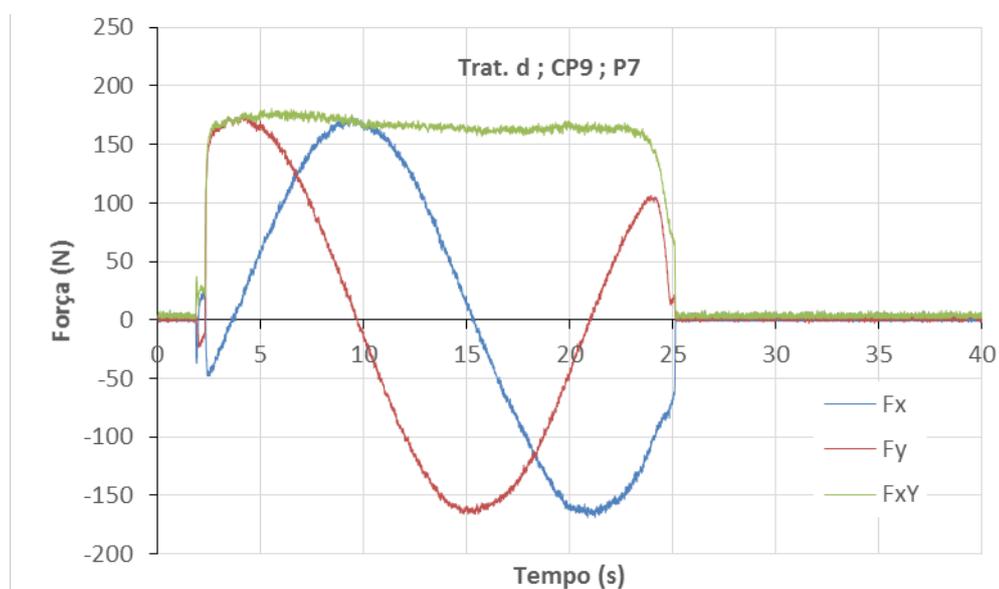
A seguir os gráficos referentes ao corpo de prova número 9, respectivamente FIGURA 125 e FIGURA 126, comportamento nos passes em Fz e projeção em Fx, Fy e Fxy para o passe 7.

FIGURA 125 - COMPORTAMENTO DOS ESFORÇOS EM FZ NOS 7 PASSES PARA O TRAT. "D", CP9.



FONTE: O autor.

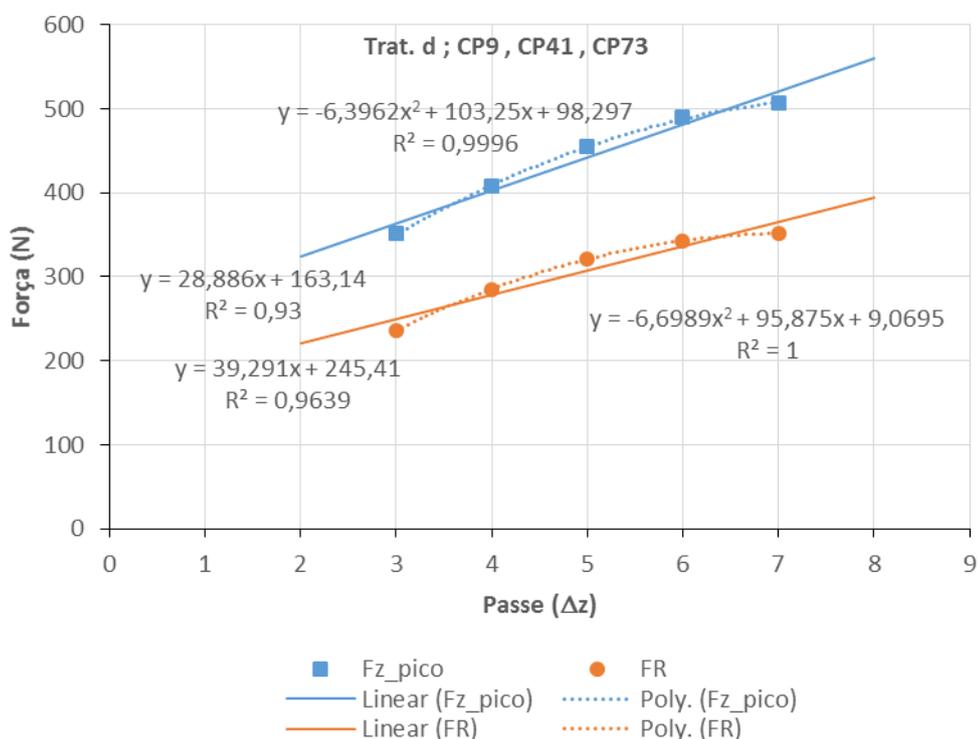
FIGURA 126 - COMPORTAMENTO DOS ESFORÇOS EM FX, FY E FXY NO PASSE 7 PARA O TRAT. "D", CP9.



FONTE: O autor.

A análise de regressão do modelo de forma simples, ou seja, considerando apenas a variação no incremento Δz dos passes de 3 a 7 para os 3 ensaios pode ser observada no gráfico da FIGURA 127. No caso do modelo que traduz a força Fz_pico o valor de R^2 ficou ligeiramente menor na equação linear, embora esse valor de 0,93 ainda seja considerado muito bom para a qualidade da representação.

FIGURA 127 - ANÁLISE DE REGRESSÃO DO MODELO PARA O TRAT. "D" NAS 3 REP.; CP9, CP41 E CP73.



FONTE: O autor.

O tratamento onde todos os fatores principais estão ajustados para o nível alto (+1) foi abordado no item 5.4 e, destarte, servem os mesmos apontamentos. Logo, não estão apresentados nesse tópico.

5.14 EM RELAÇÃO AO AVANÇO $F=150\text{MM}/\text{MIN}$

Novamente, o tratamento onde todos os fatores principais estão ajustados para o nível baixo (-1) foi abordado no item 5.2 e, destarte, servem os mesmos apontamentos. Logo, não estão apresentados nesse tópico.

Dessa maneira, na TABELA 37 tem-se os quadros com as médias dos esforços sob investigação nesse item e a análise de regressão para a combinação que contempla o ponto “abcd”, ou seja, onde apenas o avanço do punção está ajustado para o menor nível e todos os demais posicionados no nível superior (+1), isto é, o tratamento +1, +1, +1, +1, -1, referente aos testes dos corpos de prova 16, 48 e 80.

TABELA 37 - MÉDIAS DOS ESFORÇOS FZ_PICO, FR, FZ_MÉDIO E FXY PARA AS 3 REPETIÇÕES NO TRATAMENTO “ABCD”.

Passe	Corpo de Prova			Média
	16	48	80	
	Fz_pico			
1	509,76	534,18	521,48	521,81
2	849,60	862,30	841,80	851,23
3	1122,08	1125,98	1107,42	1118,49
4	1335,94	1326,18	1312,50	1324,87
5	1498,04	1491,22	1467,78	1485,68
6	1610,36	1598,64	1586,92	1598,64
7	1681,64	1676,76	1667,00	1675,13

Passe	Corpo de Prova			Média
	16	48	80	
	FR			
1	415,77	419,19	409,67	414,88
2	627,66	633,30	620,88	627,28
3	808,89	811,13	799,23	806,42
4	942,70	943,18	934,88	940,25
5	1041,68	1040,36	1033,95	1038,66
6	1114,97	1109,90	1105,42	1110,09
7	1163,47	1156,84	1154,81	1158,37

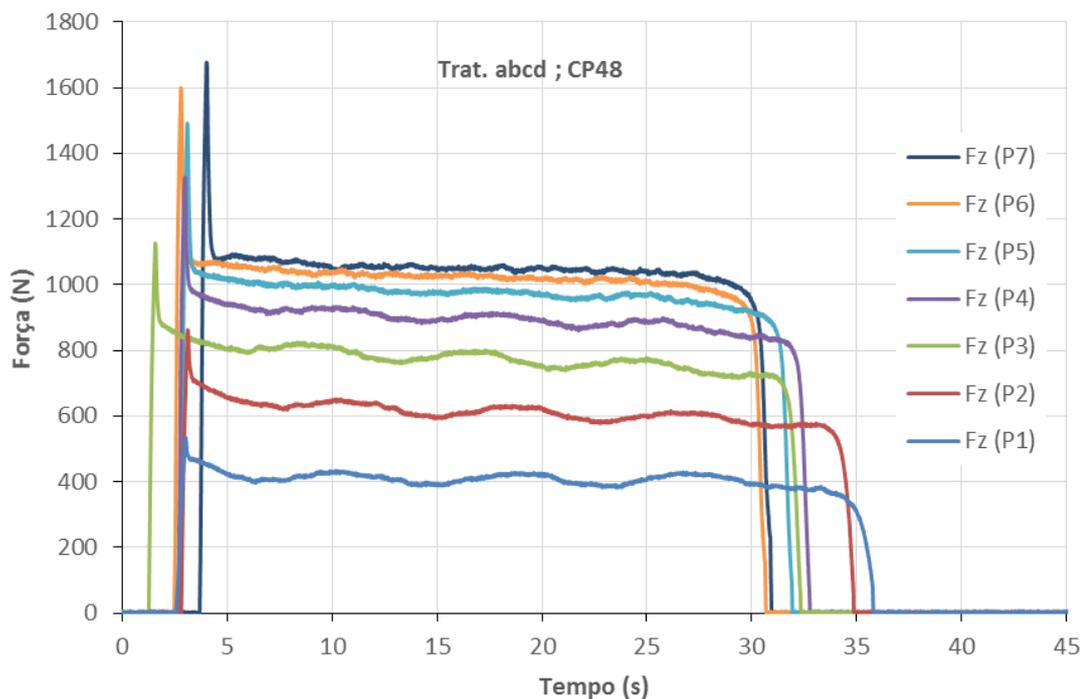
Passe	Corpo de Prova			Média
	16	48	80	
	Fz_médio			
1	403,78	406,90	397,83	402,84
2	606,00	611,26	598,98	605,42
3	774,55	776,56	765,08	772,06
4	895,21	895,37	887,25	892,61
5	976,18	974,72	968,22	973,04
6	1028,50	1024,05	1019,31	1023,96
7	1054,61	1049,37	1046,98	1050,32

Passe	Corpo de Prova			Média
	16	48	80	
	Fxy			
1	99,13	100,73	97,78	99,21
2	163,45	165,61	163,44	164,17
3	233,18	234,27	231,13	232,86
4	295,44	296,47	294,59	295,50
5	363,54	363,71	362,78	363,35
6	430,51	428,01	427,73	428,75
7	491,38	486,94	487,25	488,52

FONTE: O autor.

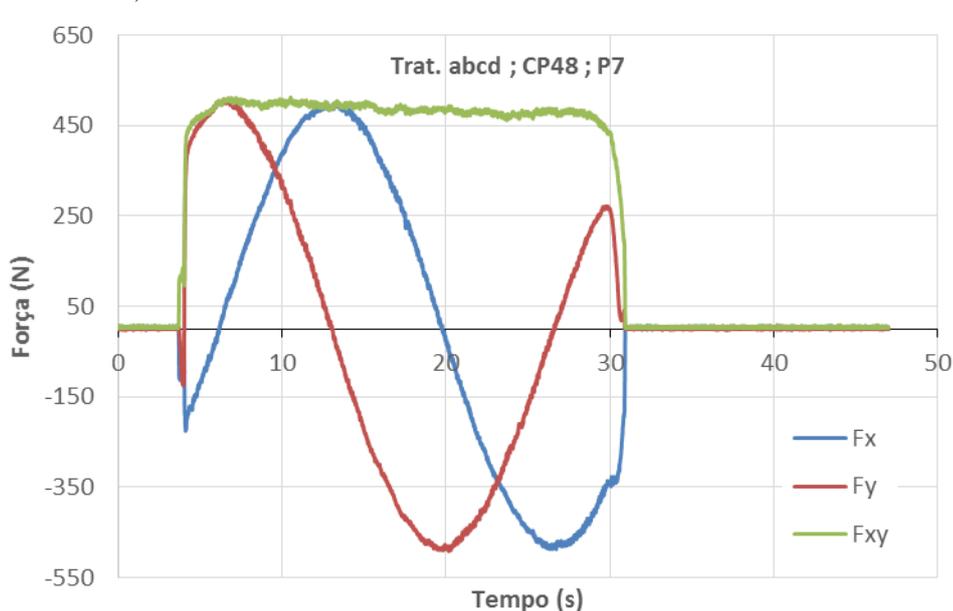
A seguir os gráficos referentes ao corpo de prova número 48, respectivamente figuras x e y, comportamento nos passes em Fz e projeção em Fx, Fy e Fxy para o passe 7. Ambos apresentam as curvas dentro da normalidade constatada para as mesmas na maioria dos testes, sem quaisquer perturbações evidenciadas.

FIGURA 128 - COMPORTAMENTO DOS ESFORÇOS EM FZ NOS 7 PASSES PARA O TRAT. "ABCD", CP48.



FONTE: O autor.

FIGURA 129 - COMPORTAMENTO DOS ESFORÇOS EM FX, FY E FXY NO PASSE 7 PARA O TRAT. "ABCD", CP48.

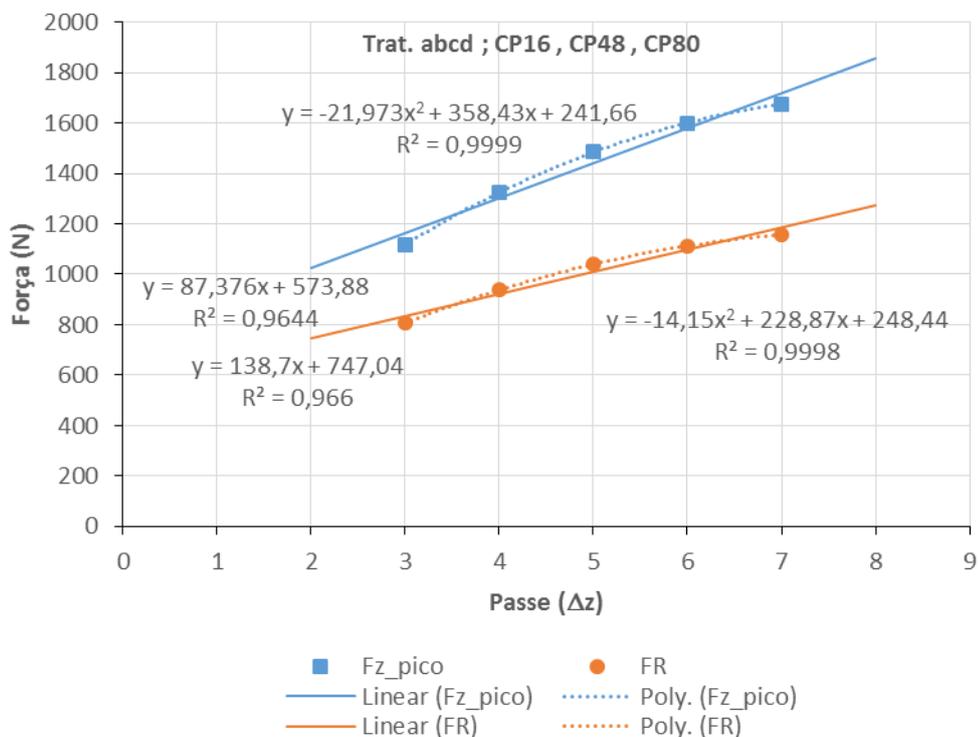


FONTE: O autor.

Por fim, a análise de regressão do modelo de forma simples, ou seja, considerando apenas a variação no incremento Δz dos passes de 3 a 7 para os 3 ensaios pode ser observada no gráfico da FIGURA 130. Registra-se que o modelo matemático nesse tópico consegue

representar muito bem o fenômeno, uma vez que R^2 é superior a 0,96 para as cargas Fz_pico e FR.

FIGURA 130 - ANÁLISE DE REGRESSÃO DO MODELO PARA O TRAT. "ABCD" NAS 3 REP.; CP16, CP48 E CP80.

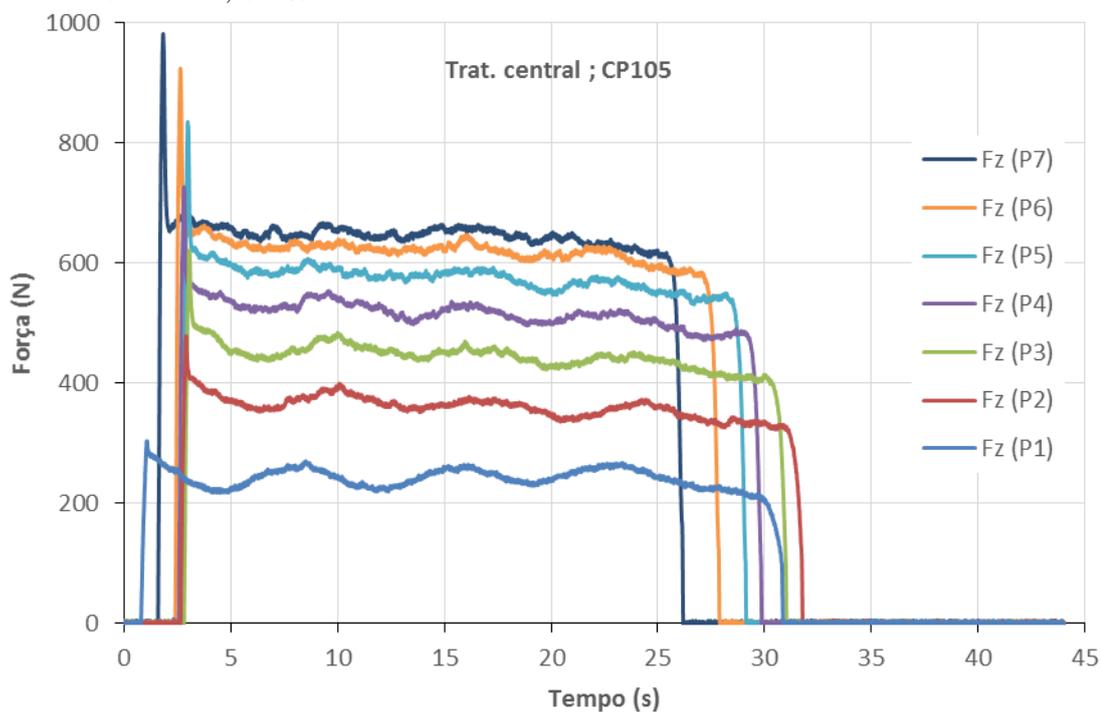


FONTE: O autor.

5.15 EM RELAÇÃO AO AVANÇO $F=175\text{MM}/\text{MIN}$

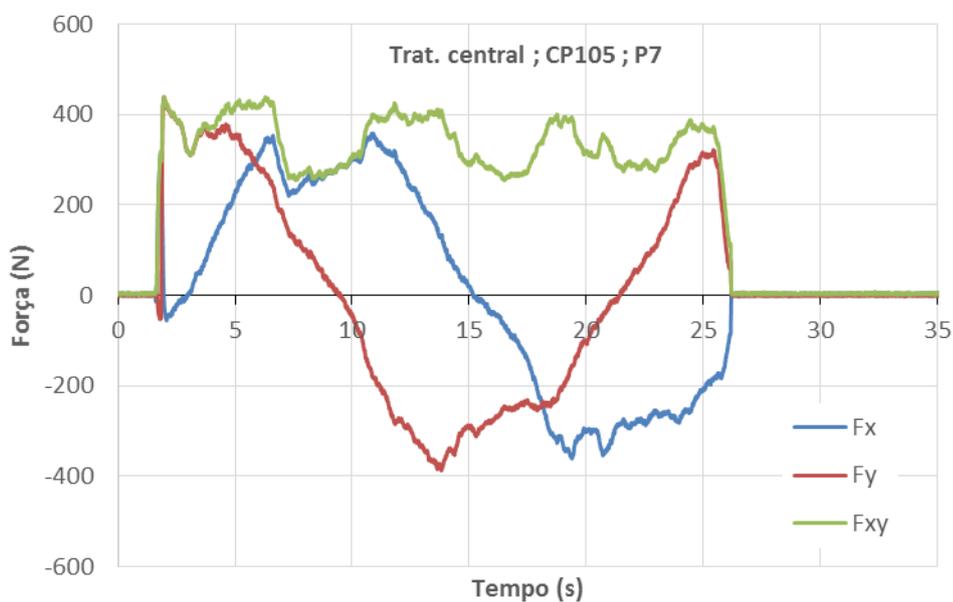
Conforme já abordado, nesse item apresentam-se os últimos gráficos dos corpos de prova testados no ponto central (FIGURAS 131 a 134), isto é, da corrida de 10 ensaios realizada no nível intermediário esses resultados são os complementares, respectivamente número 105 e número 106.

FIGURA 131- COMPORTAMENTO DOS ESFORÇOS EM FZ NOS 7 PASSES PARA O TRAT. CENTRAL, CP105.



FONTE: O autor.

FIGURA 132 - COMPORTAMENTO DOS ESFORÇOS EM FX, FY E FXY NO PASSE 7 PARA O TRAT. CENTRAL, CP105.

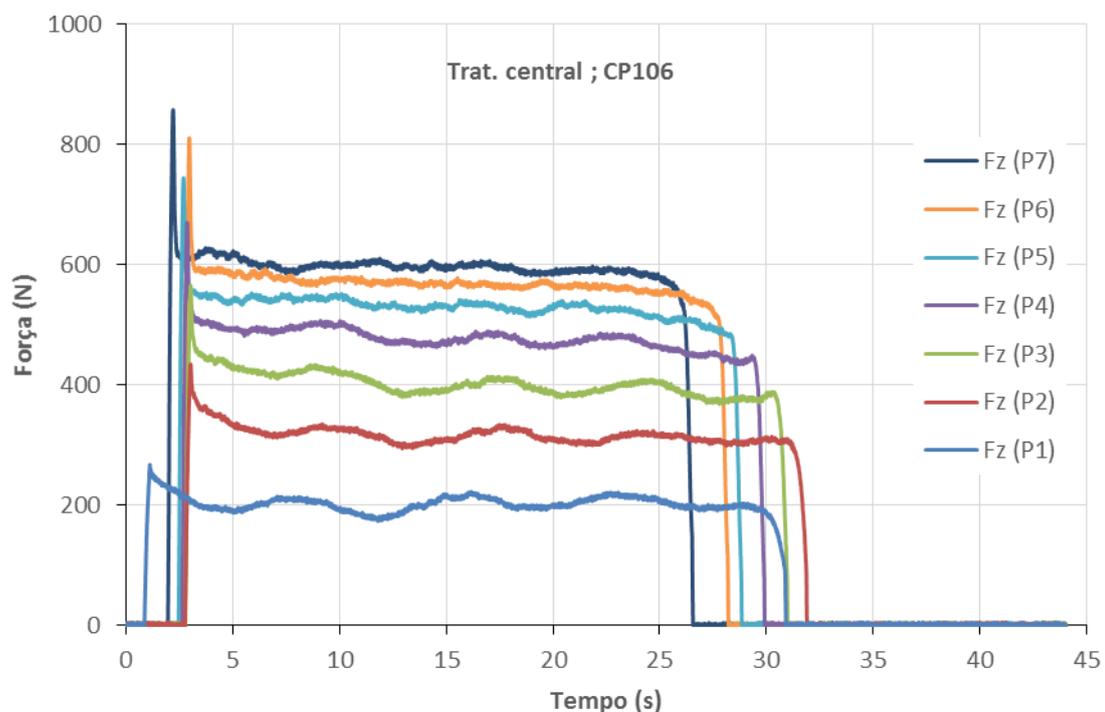


FONTE: O autor.

Destaca-se, sobremaneira, o registro de forte ruído no ensaio do corpo de prova 105 quando comparado por exemplo com o 106, portanto, esse ponto foi monitorado

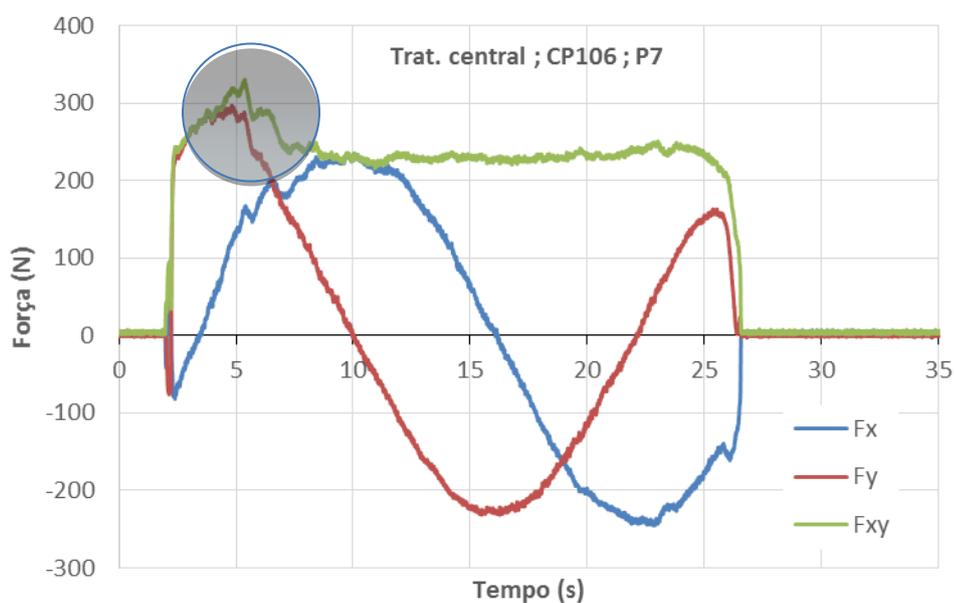
cuidadosamente e, eventualmente, considerado um *outlier* nas análises vindouras. No tópico 6.8 está discutida essa ocorrência.

FIGURA 133 - COMPORTAMENTO DOS ESFORÇOS EM FZ NOS 7 PASSES PARA O TRAT. CENTRAL, CP106.



FONTE: O autor.

FIGURA 134 - COMPORTAMENTO DOS ESFORÇOS EM FX, FY E FXY NO PASSE 7 PARA O TRAT. CENTRAL, CP106.



FONTE: O autor.

5.16 EM RELAÇÃO AO AVANÇO F=200MM/MIN

Na TABELA 38 verifica-se o quadro com as médias para os esforços investigados e, na sequência, a respectiva análise de regressão, ambos para o tratamento “e”, -1, -1, -1, -1, +1, ou seja, os testes referentes aos corpos de prova 17, 49 e 81.

TABELA 38 - MÉDIAS DOS ESFORÇOS FZ_PICO, FR, FZ_MÉDIO E FXY PARA AS 3 REPETIÇÕES NO TRATAMENTO “E”.

Passe	Corpo de Prova			Média
	17	49	81	
	Fz_pico			
1	17,58	21,48	16,60	18,55
2	87,90	91,80	84,96	88,22
3	160,16	162,10	158,20	160,15
4	213,86	212,90	217,78	214,85
5	238,28	243,16	241,22	240,89
6	269,54	273,44	270,50	271,16
7	292,00	295,90	294,92	294,27

Passe	Corpo de Prova			Média
	17	49	81	
	FR			
1	5,66	10,88	4,68	7,07
2	70,69	75,13	65,76	70,53
3	128,21	132,20	122,99	127,80
4	160,87	164,08	159,65	161,53
5	185,73	188,78	184,85	186,45
6	211,96	213,83	210,57	212,12
7	232,42	235,87	232,23	233,51

Passe	Corpo de Prova			Média
	17	49	81	
	Fz_médio			
1	4,43	10,21	3,48	6,04
2	69,44	73,30	64,30	69,01
3	124,65	127,33	119,02	123,67
4	154,75	155,75	152,42	154,30
5	178,72	179,43	176,09	178,08
6	203,90	203,23	200,78	202,64
7	222,41	223,04	220,35	221,93

Passe	Corpo de Prova			Média
	17	49	81	
	Fxy			
1	3,52	3,75	3,14	3,47
2	13,23	16,48	13,77	14,49
3	29,99	35,57	30,98	32,18
4	43,95	51,64	47,51	47,70
5	50,57	58,66	56,24	55,16
6	57,88	66,48	63,44	62,60
7	67,46	76,73	73,33	72,51

FONTE: O autor.

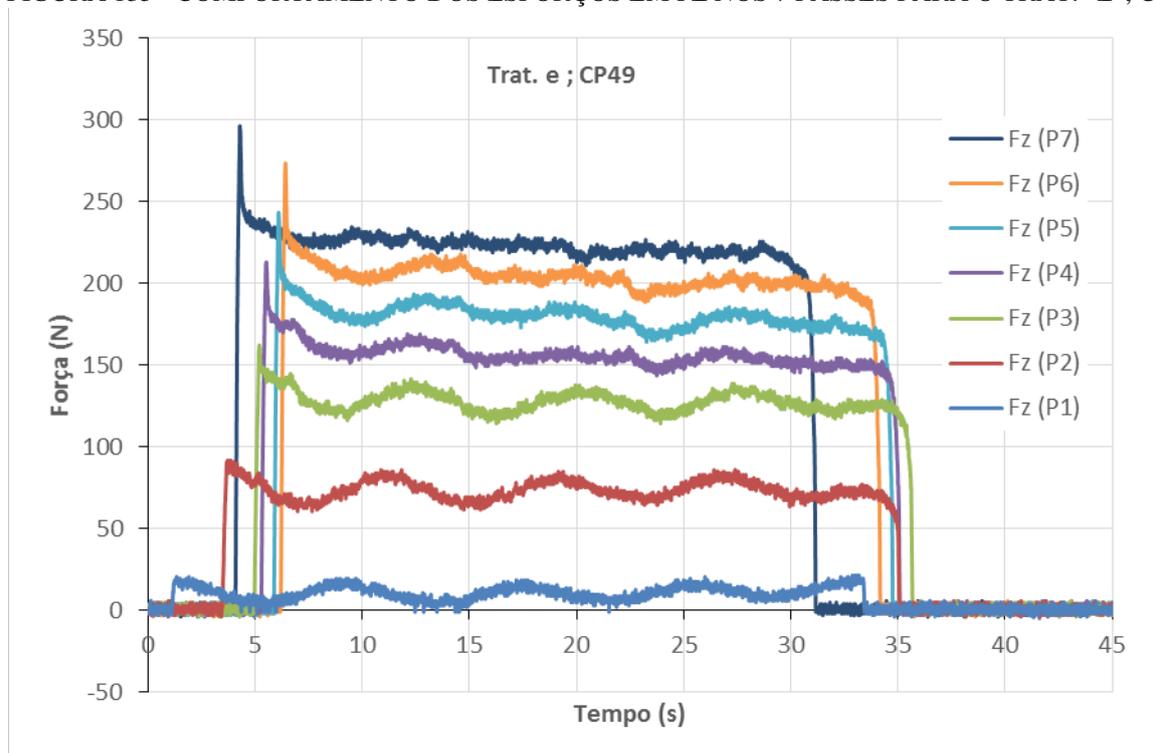
A seguir os gráficos referentes ao corpo de prova número 49, respectivamente FIGURA 135 e FIGURA 136, comportamento nos passes em Fz e projeção em Fx, Fy e Fxy para o passe 7.

Na gráfico que contempla a sobreposição das forças Fz em cada passe, novamente, visualiza-se a tendência de estreitamento dos degraus na medida que o incremento avança, ou seja, o nítido achatamento das amplitudes Fz_pico versus Fz_médio e a suavização das diferenças entre os patamares de cargas monitoradas.

Por último, no gráfico das curvas Fx e Fy percebe-se o aparecimento de vibrações sempre próximas aos pontos de inversão de direção do punção em y, isto é, em torno dos

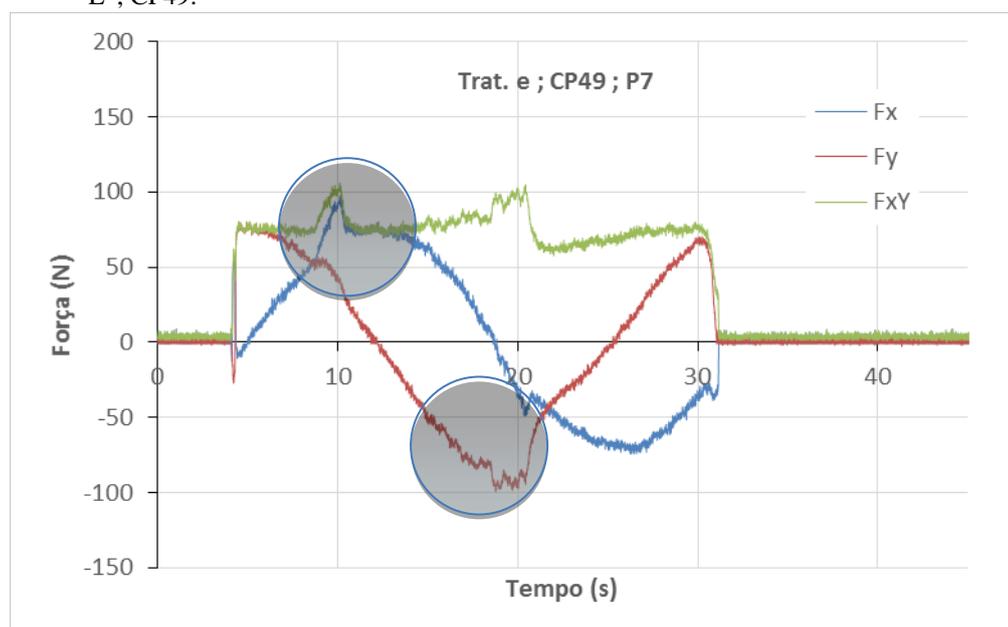
tempos 10s e 20s, respectivamente coordenadas $(-y,0)$ e $(+y,0)$. A oscilação ocorre ora no eixo x e ora no eixo y , entretanto, destaca-se que esse efeito surge em baixos patamares de esforços, visivelmente menores que 300N.

FIGURA 135 - COMPORTAMENTO DOS ESFORÇOS EM FZ NOS 7 PASSES PARA O TRAT. "E", CP49.



FONTE: O autor.

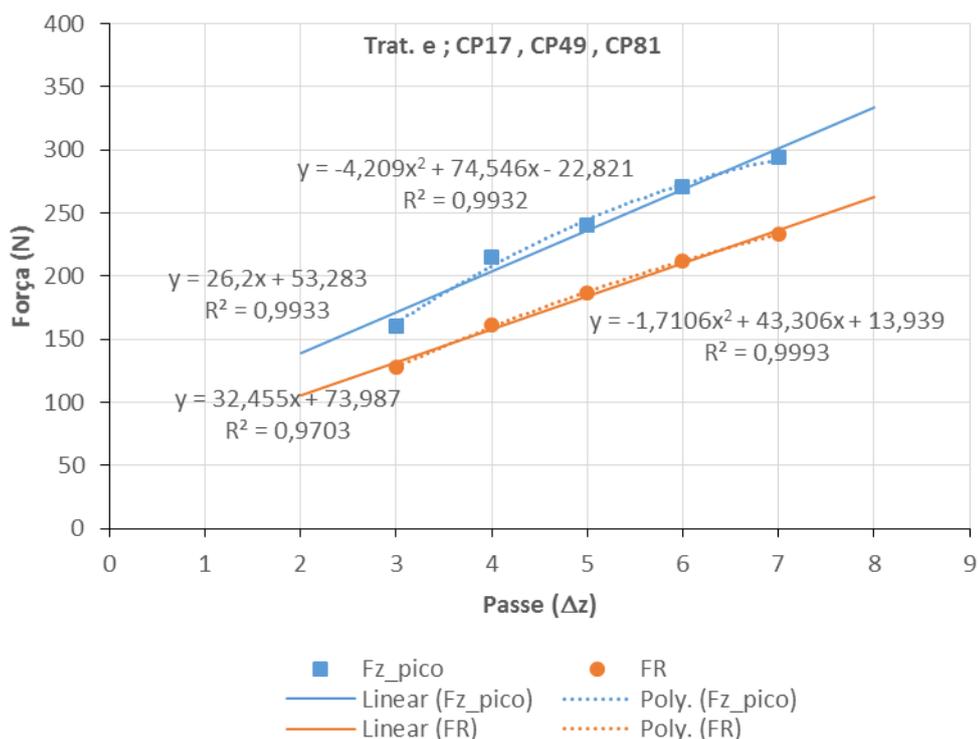
FIGURA 136 - COMPORTAMENTO DOS ESFORÇOS EM FX, FY E FXY NO PASSE 7 PARA O TRAT. "E", CP49.



FONTE: O autor.

A análise de regressão do modelo de forma simples, ou seja, considerando apenas a variação no incremento Δz dos passes de 3 a 7 para os 3 ensaios pode ser observada no gráfico da FIGURA 137. Ressalta-se que o coeficiente de determinação nesse caso é muito bom, acima de 0,97 tanto para a força Fz_pico quanto para a FR na regressão linear.

FIGURA 137 - ANÁLISE DE REGRESSÃO DO MODELO PARA O TRAT. "E" NAS 3 REP.; CP17, CP49 E CP81.



FONTE: O autor.

O tratamento onde todos os fatores principais estão ajustados para o nível alto (+1) foi abordado no item 5.4 e, destarte, servem os mesmos apontamentos. Logo, não estão apresentados nesse tópico.

5.17 RESUMO

Assim sendo, nesse capítulo, descreveu-se uma metodologia inovadora para a apresentação dos resultados obtidos a partir do planejamento experimental proposto, ou seja, por intermédio de uma varredura lógica, intensa e criteriosa pode-se investigar o comportamento de cada fator principal nas suas respectivas extremidades. Logo, expondo a fotografia de cada parâmetro, individualmente, e, por conseguinte, possibilitando a avaliação do contraste por este produzido com bastante segurança, acarretando, nesse sentido, adensar

as análises estatísticas decorrentes do DOE (delineamento de experimentos) fatorial 2^5 completo abordado no tópico seguinte. Isto posto, no próximo capítulo encontra-se toda a análise matemática do fenômeno cuja a variável resposta é, naturalmente, a força que apresenta os maiores patamares, nesse caso, a força Fz_pico . Evidentemente quanto menor a força Fz_pico melhor para a performance do processo ISF uma vez que mitigam-se os riscos para o equipamento, punção e chapa.

6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

6.1 INTRODUÇÃO

Nesse tópico está descrita a análise do delineamento experimental DOE fatorial 2⁵ conduzida nessa pesquisa, esmiuçando-se a abordagem estatística que proporciona discussões científicas acerca do fenômeno em evidência, e que permite apontamentos tecnológicos que visam desenvolver a performance do processo de conformação incremental de chapas (ISF) quando da utilização de máquinas-ferramentas CNC como equipamento preponderante ao conjunto. Além disso, somam-se às análises DOE os resultados obtidos e descritos no capítulo 5. Desse modo, como primeira etapa para a adequada manipulação dos dados obtidos por intermédio do trabalho, foi montada a malha de informações correspondente ao experimento fatorial 2⁵ no ambiente Minitab. Logo na FIGURA 138 abaixo, tem-se um exemplo da tela principal do software com as respectivas colunas das variáveis de entrada e a variável resposta para a corrida estatística sob investigação. Destaca-se que a ordem padrão da organização da corrida é igual à ordem dos ensaios conforme registrado no item 4.8.2.

FIGURA 138 - TELA PRINCIPAL DO MINITAB COM AS VARIÁVEIS DO DOE.

The screenshot shows the Minitab software interface. The top part displays a regression equation for the response variable 'Fz_pico P7'. Below the equation is a table of aliases. The bottom part shows a worksheet with 15 columns: C1 (OrdemPad), C2 (OrdemEns), C3 (PtCentral), C4 (Blocos), C5 (dt), C6 (alfa), C7 (t), C8 (dz), C9 (f), C10 (Fz_pico P7), C11 (RESI1), C12 (RESI2), C13 (RESI3), C14 (RESI4), and C15. The data table contains 9 rows of experimental runs.

Equação de Regressão em Unidades Não codificadas

$$\begin{aligned} \text{Fz_pico P7} = & -1050 + 117 \text{ dt} + 20,1 \text{ alfa} + 2105 \text{ t} + 583 \text{ dz} + 6,7 \text{ f} - 3,20 \text{ dt*alfa} - 137 \text{ dt*t} \\ & - 1 \text{ dt*dz} - 0,94 \text{ dt*f} - 38,9 \text{ alfa*t} - 22,1 \text{ alfa*dz} - 0,165 \text{ alfa*f} - 398 \text{ t*dz} \\ & - 11,8 \text{ t*f} - 7,5 \text{ dz*f} + 5,0 \text{ dt*alfa*t} + 1,5 \text{ dt*alfa*dz} + 0,0239 \text{ dt*alfa*f} \\ & - 37 \text{ dt*t*dz} + 1,36 \text{ dt*t*f} + 0,52 \text{ dt*dz*f} + 57 \text{ alfa*t*dz} + 0,332 \text{ alfa*t*f} \\ & + 0,191 \text{ alfa*dz*f} + 12,2 \text{ t*dz*f} - 1,5 \text{ dt*alfa*t*dz} - 0,0422 \text{ dt*alfa*t*f} \\ & - 0,0173 \text{ dt*alfa*dz*f} - 0,36 \text{ dt*t*dz*f} - 0,414 \text{ alfa*t*dz*f} \\ & + 0,034 \text{ dt*alfa*t*dz*f} - 16,09 \text{ Pt Ct} \end{aligned}$$

Estrutura de Aliases

Fator	Nome
A	dt
B	alfa
C	t
D	dz
E	f

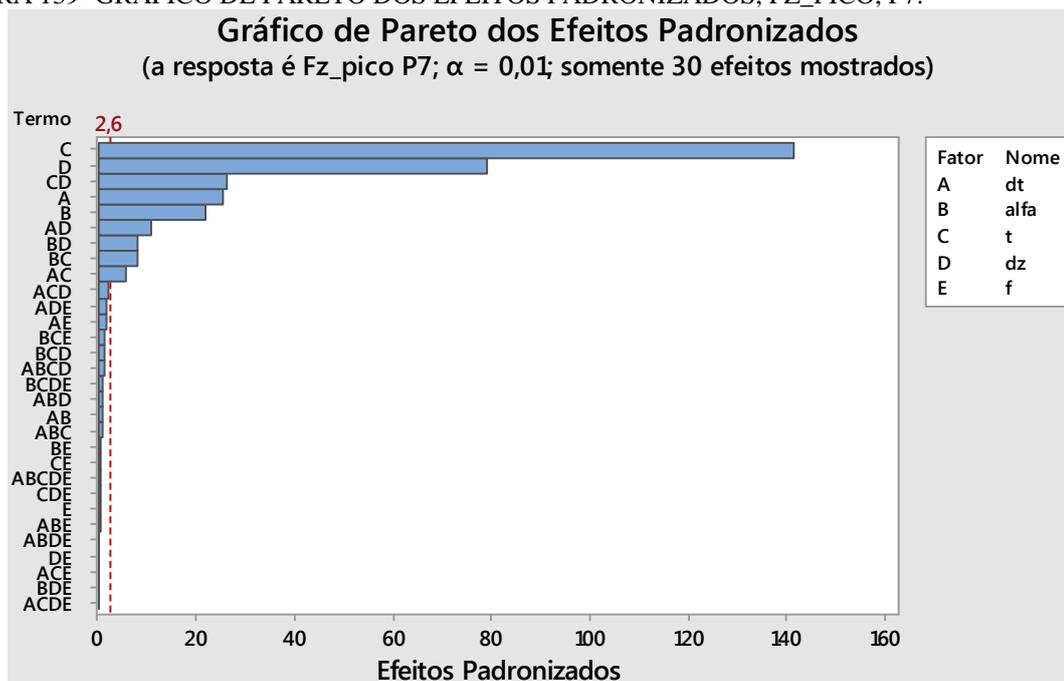
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15
	OrdemPad	OrdemEns	PtCentral	Blocos	dt	alfa	t	dz	f	Fz_pico P7	RESI1	RESI2	RESI3	RESI4	
1	1	1	1	1	5	40	0,43	0,4	150	308,60	12,7000	12,7000	12,7000	12,7000	
2	2	2	1	1	8	40	0,43	0,4	150	339,84	-12,0467	-12,0467	-12,0467	-12,0467	
3	3	3	1	1	5	60	0,43	0,4	150	333,98	7,4867	7,4867	7,4867	7,4867	
4	4	4	1	1	8	60	0,43	0,4	150	380,86	0,0000	-0,0000	0,0000	0,0000	
5	5	5	1	1	5	40	0,80	0,4	150	829,10	3,9067	3,9067	3,9067	3,9067	
6	6	6	1	1	8	40	0,80	0,4	150	921,88	2,6067	2,6067	2,6067	2,6067	
7	7	7	1	1	5	60	0,80	0,4	150	939,46	15,6267	15,6267	15,6267	15,6267	
8	8	8	1	1	8	60	0,80	0,4	150	996,10	-22,4600	-22,4600	-22,4600	-22,4600	
9	9	9	1	1	5	40	0,43	0,8	150	503,90	-2,9333	-2,9333	-2,9333	-2,9333	

FONTE: O autor.

Verifica-se na figura anterior que as eventuais falhas ocorridas no decorrer do procedimento de aquisição dos esforços estão contempladas e apontadas pelo símbolo “*”, linha 10 e coluna C10. Sendo assim, nessa malha de valores, referidas falhas são consideradas como falta quando do ciclo de análise DOE, todavia, não fragilizam as respectivas discussões científicas. Outro aspecto importante diz-se em relação à principal variável resposta assumida nesse momento, pois, naturalmente, como a maior carga presente no processo de deformação foi a força Fz_pico, por consequência, essa torna-se a respectiva variável resposta. Registra-se que foram conduzidas análises similares assumindo como variável resposta a força resultante FR, entretanto, apesar de tais resultados indicarem as mesmas tendências, apresentaram valores inferiores para as cargas de deformação encontradas quando a variável resposta aplicada foi, de fato, Fz_pico. Dessa maneira, utilizaram-se os dados referentes ao passe 7 como variável resposta ao DOE por serem, justamente, o patamar de maior esforço. Isto posto, resta claro que a Fz_pico P7 (passe 7) volta-se como a carga mais crítica e, assim, a mais relevante para a assertiva discussão em curso.

Desta sorte, a primeira etapa desses cálculos estatísticos é a correta determinação de quais efeitos individuais e interações são considerados significativos à luz do coeficiente de confiança $\alpha=99\%$, ou seja, a definição de uma lista de fatores individuais e/ou interações que realmente influenciam a magnitude da variável resposta Fz_pico P7, impactando, conseqüentemente, na performance do processo ISF.

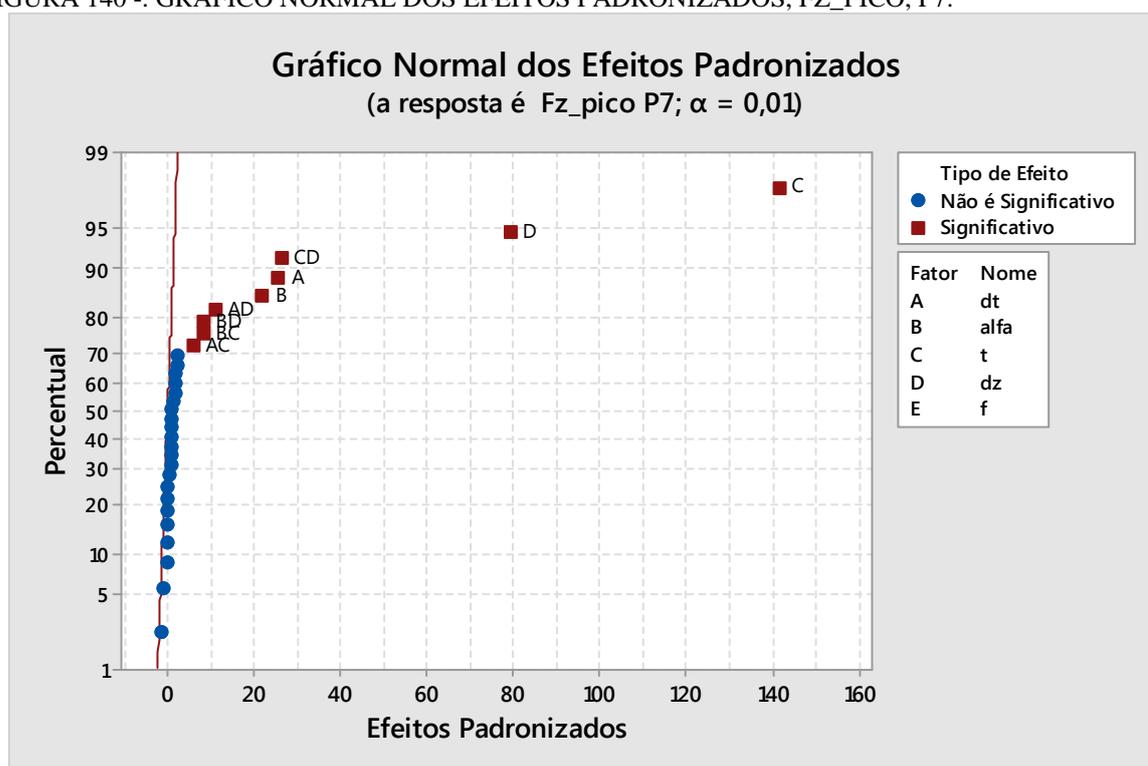
FIGURA 139- GRÁFICO DE PARETO DOS EFEITOS PADRONIZADOS, FZ_PICO, P7.



FONTE: O autor.

Nesse cenário, a FIGURA 139, página anterior, e a FIGURA 140, abaixo, trazem o gráfico de Pareto dos efeitos padronizados e o respectivo gráfico normal onde, por meio do método de Lenth, claramente, estão destacados os 9 termos considerados significativos ao modelo matemático delineado.

FIGURA 140 -. GRÁFICO NORMAL DOS EFEITOS PADRONIZADOS, FZ_PICO, P7.



FONTE: O autor.

Na TABELA 39 estão indicados os 9 termos significativos em ordem de relevância, com o devido nome atribuído ao efeito. Dessa maneira, os demais termos não são significativos em relação à variável resposta Fz_pico (P7), porém, podem ser importantes sob outros aspectos tecnológicos, a exemplo do fator f (avanço), cuja discussão específica está justamente exposta no próximo tópico.

Assim, com o objetivo de organizar e sintetizar a apresentação das 4 análises individuais e das 5 interações de 2ª ordem, optou-se por agrupar em blocos os comportamentos semelhantes, de maneira que os fatores que nitidamente seguem a mesma lógica de interpretação e raciocínio estão num subtópico apenas. Já o fator “f”, por ser o único fator individual não significativo, está contemplado num subtópico à parte. Portanto, na TABELA 40, encontra-se tal distribuição e seus subtópicos.

TABELA 39 - TERMOS SIGNIFICATIVOS OBTIDOS POR INTERMÉDIO DA ANÁLISE DOE, 2⁵.

Ordem de Relevância	Termo	Efeito
1	C	t
2	D	Δz
3	CD	$t * \Delta z$
4	A	d_t
5	B	α
6	AD	$d_t * \Delta z$
7	BD	$\alpha * \Delta z$
8	BC	$\alpha * t$
9	AC	$d_t * t$

FONTE: O autor.

TABELA 40 - ORGANIZAÇÃO DOS SUBTÓPICOS CONFORME SEMELHANÇA DO COMPORTAMENTO DO TERMO EM ANÁLISE.

Blocos	Subtópico	Comportamento*
f	6.2.	não-significativo
t e Δz	6.3.	significativo linear
dt e α	6.4.	significativo 2 ^a ordem
$t * \Delta z$	6.5.	extremidade branda
$d_t * \Delta z, \alpha * \Delta z, \alpha * t$ e $d_t * t$	6.6.	extremidade larga
Análise de Regressão	6.7.	modelo estatístico
Análise Residual	6.8.	sinal ruído

*Indicação decorrente das análises estatísticas em curso

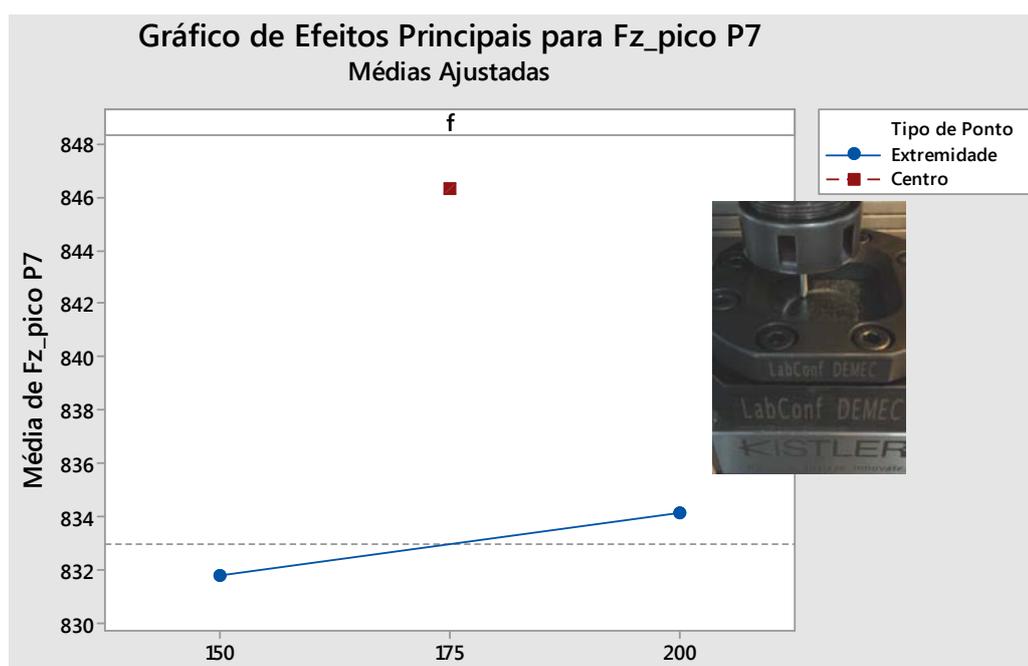
FONTE: O autor.

Desse modo, a partir do próximo item, expõe-se toda a abordagem teórico-experimental do trabalho, qual seja, a principal contribuição científica da pesquisa, a qual que tem como premissa o desenvolvimento do processo de estampagem incremental de chapas (ISF) de maneira tecnologicamente possível, economicamente viável e, sobretudo, ambientalmente correta.

6.2 INFLUÊNCIA DO AVANÇO F

Em relação ao avanço do punção “f”, foram testados os níveis 150mm/min, 175mm/min e 200mm/min, entretanto, a avaliação estatística indica que, para essa configuração experimental, o respectivo fator **não é significativo**. Na FIGURA 141, encontra-se o gráfico de efeitos principais. No entanto, percebe-se claramente que o ponto central está deslocado para cima da linha das extremidades, o que pode ser uma pista de o comportamento desse fator segue uma equação polinomial. Entretanto, como o respectivo fator é considerado não significativo, optou-se, nesse sentido, por esgotar a investigação estatística nesse instante. Todavia, em termos de parâmetro de processo, registra-se que, quanto maior o avanço da ferramenta, menor será o tempo de produção da chapa, o que é absolutamente relevante no que se refere à produtividade do processo. Contudo, deve-se ponderar que, por ora o objetivo principal da tecnologia ISF é a produção de pequenos lotes ou protótipos onde o tempo efetivo de produção não é considerado característica crítica, porém, à luz do aspecto econômico, a rápida obtenção da chapa é mais favorável à tecnologia. Logo, o patamar de esforço registrado para essa variável é em torno de 833N tanto para o nível (-1), equivalente ao ajuste 150mm/min, quanto para o nível (+1), equivalente ao ajuste 200mm/min, evidentemente para o arranjo estabelecido em curso.

FIGURA 141 - GRÁFICO DE EFEITOS PRINCIPAIS “F”, FZ_PICO, P7.



FONTE: O autor.

Desse modo, conclui-se que se pode ajustar o fator principal “f” para o maior valor possível ao processo em desenvolvimento sem acarretar significativo incremento na força máxima de deformação da chapa Fz_pico e, conseqüentemente, se consegue reduzir o tempo de produção da chapa, sempre observando, logicamente, aspectos sensíveis à integridade do sistema, como eventuais vibrações do punção ou, até mesmo, danos à superfície da chapa impressa em decorrência de deslizamentos engripados. Nesse contexto, a lubrificação tende a influenciar no resultado, de modo que se sugere aprofundar a pesquisa para maiores conclusões nesse tema específico pois, segundo Tiburi 2007, a lubrificação entre as partes em contato aumenta significativamente o grau de estampabilidade da chapa e, paralelamente, reduz o risco de ocorrer aderência entre os respectivos materiais da ferramenta e da peça. Para tanto, indica-se maximizar o parâmetro avanço “f” no limite do processo em questão, desde que não haja danos colaterais.

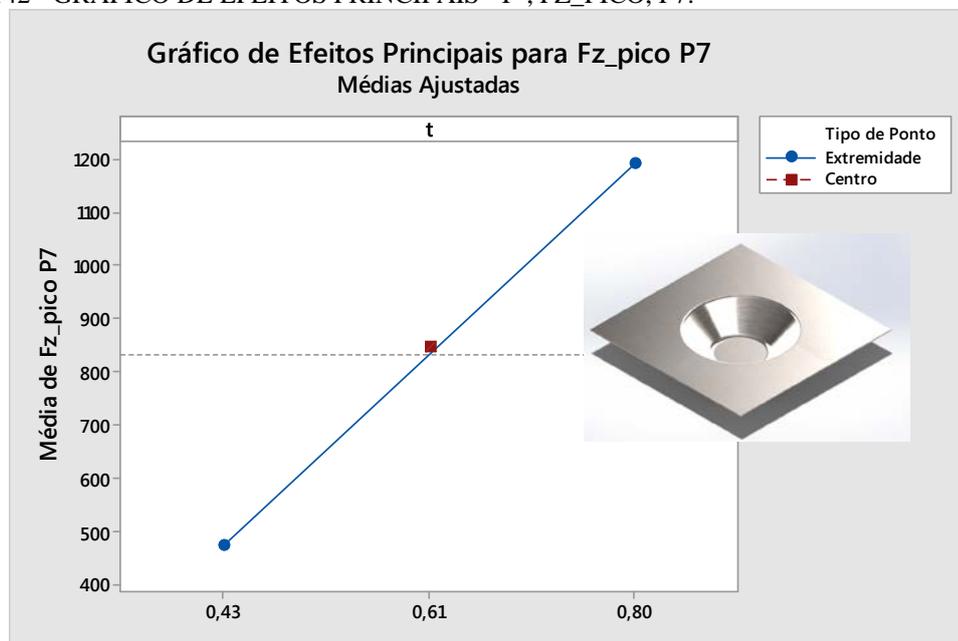
6.3 INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DA CHAPA T E DO INCREMENTO ΔZ

Os fatores principais, espessura da chapa “t” e incremento no eixo z, “ ΔZ ”, apresentam fotografia muito parecida, porquanto ambos são considerados **significativos** ao processo, com forte influência no valor da variável resposta na medida em que se altera cada fator do nível baixo (-1) para o nível alto (+1), conforme FIGURA 142 e FIGURA 143, com os respectivos gráficos de efeitos principais. Verifica-se, também, que nos 2 casos, o ponto central encontra-se alinhado com a reta que une as extremidades, ou seja, um indício do comportamento linear tanto para a espessura da chapa “t” quanto para o incremento em z, “ ΔZ ”.

Em termos de espessura da chapa “t”, encontra-se uma variação maior entre a carga obtida para o nível baixo (-1) e a carga obtida para o nível alto (+1), pontos 480N e 1180N, respectivamente, e diferença aproximada de 700N, observada no gráfico da FIGURA 142. Por outro lado, em termos de incremento em z, “ ΔZ ”, a variação entre os níveis é algo em torno de 400N, pontos 630N e 1030N, encontrada no gráfico da FIGURA 143. Isso evidencia uma tendência para um aumento maior da força de conformação Fz_pico na medida em que a espessura da chapa “t” aumenta, do que o crescimento verificado na medida em que o incremento em z, “ ΔZ ” aumenta. Naturalmente, essa consideração deve ser levada em conta com ressalvas e, nesse instante, torna-se apenas uma contribuição para as demais análises, haja vista que a espessura da chapa é basicamente parâmetro de projeto, enquanto incremento

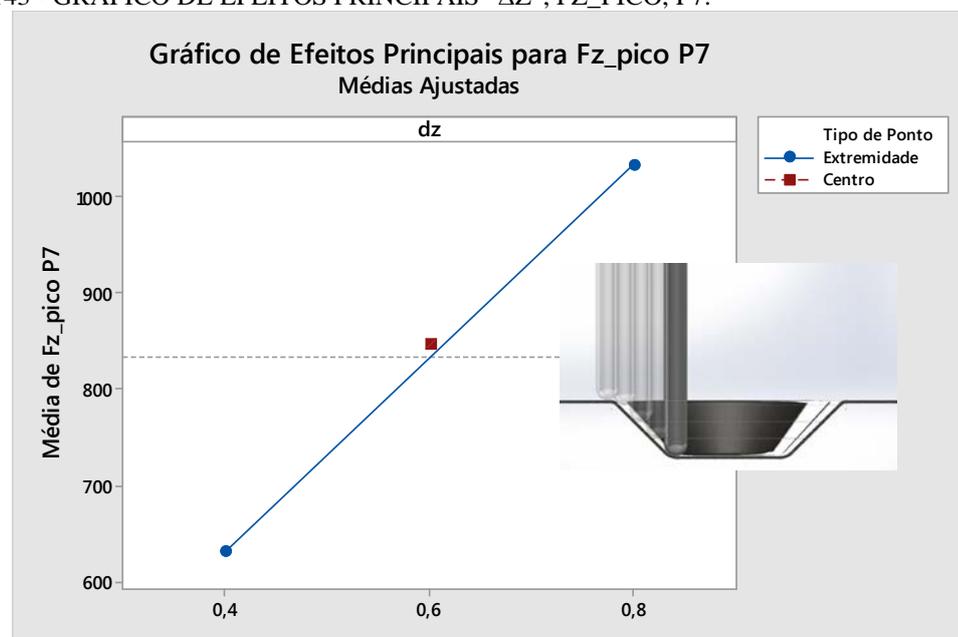
em z, “ Δz ”, é parâmetro de processo, embora “ Δz ” tenda a ser o parâmetro de processo mais importante ao ajustamento da máquina.

FIGURA 142 - GRÁFICO DE EFEITOS PRINCIPAIS “T”, FZ_PICO, P7.



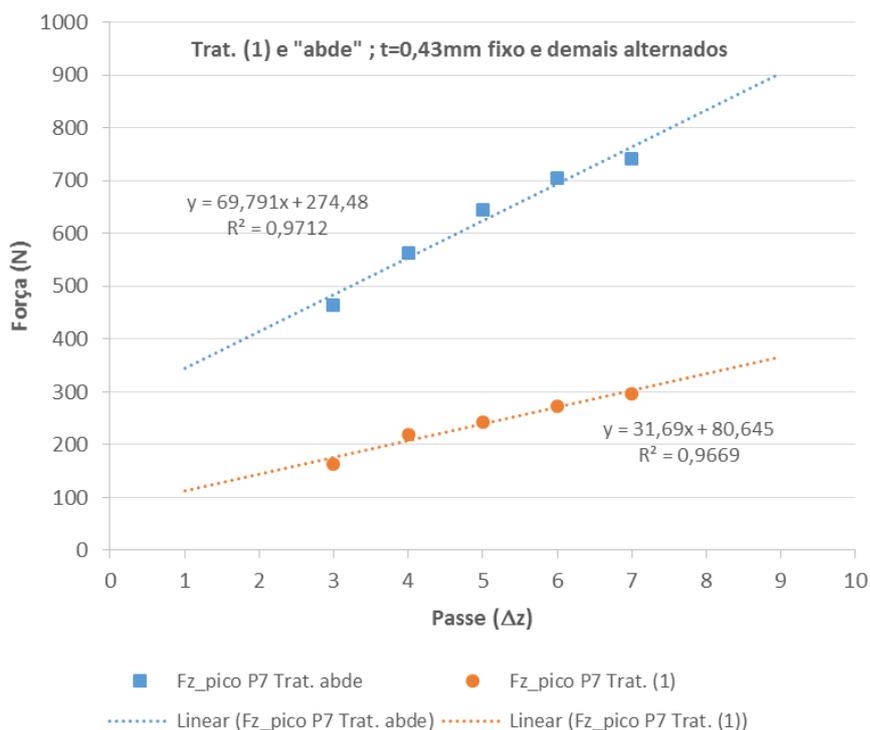
FONTE: O autor.

FIGURA 143 - GRÁFICO DE EFEITOS PRINCIPAIS “ Δz ”, FZ_PICO, P7.



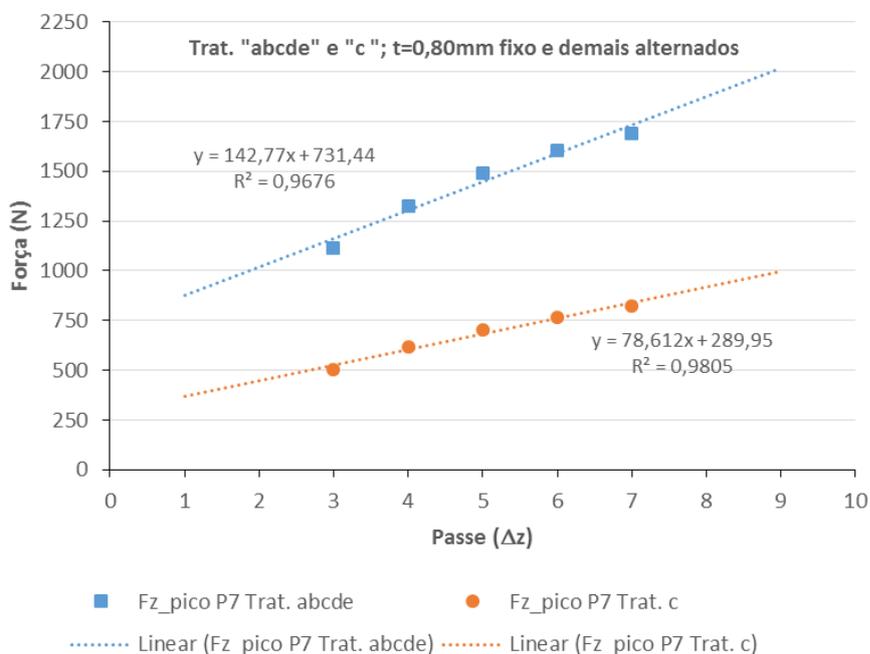
FONTE: O autor.

FIGURA 144 GRÁFICO DE CONTRASTE DOS NÍVEIS COM ESPESSURA FIXA EM (-1), T=0,43MM.



FONTE: O autor.

FIGURA 145 - GRÁFICO DE CONTRASTE DOS NÍVEIS COM ESPESSURA FIXA EM (+1), T=0,80MM.



FONTE: O autor.

Nos gráficos da FIGURA 144 e da FIGURA 145, adicionalmente, observam-se os contrastes em relação à espessura da parede, ou seja, no primeiro gráfico tem-se “t” fixo em 0,43mm e os demais fatores ora ajustados para o nível baixo (-1), tratamento (1), e ora

ajustados para o nível alto (+1), tratamento “abde”. A mesma lógica de exposição pode ser verificada no segundo gráfico, FIGURA 145, onde neste instante “t” mantém-se fixo em 0,80mm, e todos os outros fatores posicionados no patamar superior (+1), tratamento “abcde” e, o inverso, na curva complementar, tratamento “c”.

Primeiramente, destaca-se que, para todas as análises de regressão, o valor do coeficiente de determinação R^2 é muito bom, sendo, em todos os casos, maior que 0,96. Logo, pode ser considerado para a avaliação em andamento o modelo linear como um bom ajustamento para o fator puro. Outra característica é quanto à forma do par de retas, o qual assemelha-se em ambos os contrastes expostos, indicando que a espessura do material deve acarretar comportamento linear na variável resposta Fz_pico , isto é: quando se tem apenas um grau de liberdade – espessura da peça – oscilando numa dada configuração de processo, a força máxima Fz_pico deve apresentar comportamento linear.

Assim sendo, a seguir, listam-se algumas percepções a partir do estudo desses gráficos decorrentes da varredura estatística conjuntamente ao gráfico de efeitos principais:

- a) Pode ser considerado comportamento linear o modelo de regressão para o fator “t”;
- b) O fator espessura de chapa tem forte influência na força máxima, ou seja, em Fz_pico ; e
- c) A condição para $t=0,43mm$ e todos os demais fatores posicionados no nível alto (+1) é semelhante à condição do ensaio onde $t=0,80mm$ e todos os demais fatores posicionados no nível baixo (-1), ou seja, pode-se manipular nitidamente as variáveis para minimizar as cargas mesmo tendo de conformar chapas espessas, proporcionando, dessa feita, uma maior abrangência no campo de aplicação da tecnologia em termos de espessura de chapa.

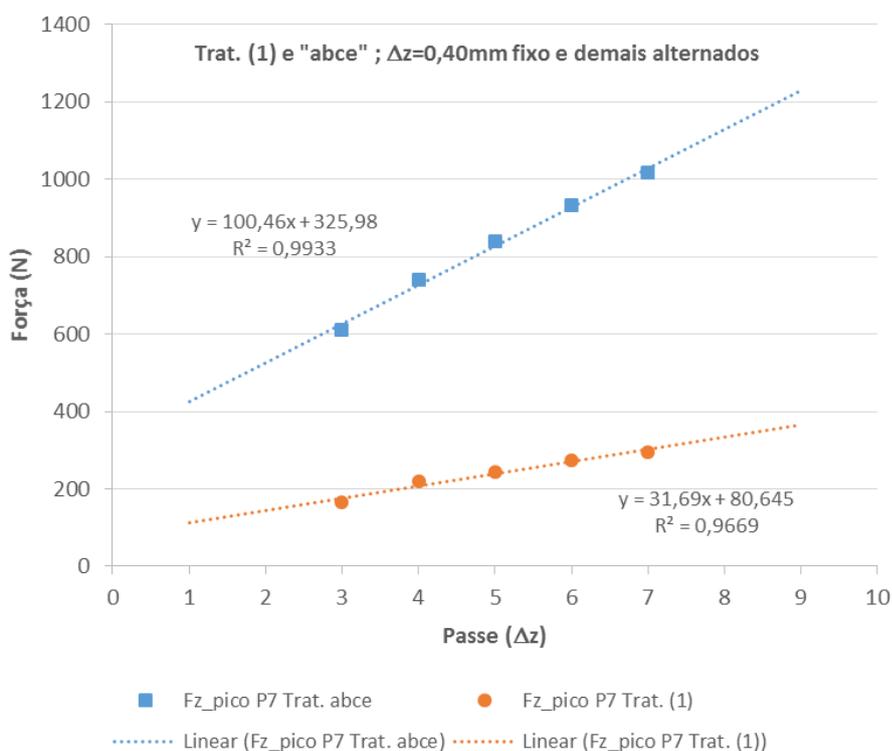
Nas figuras das próximas páginas, traz-se as fotografias análogas ao exposto acima, a saber: no gráfico da FIGURA 146 o contraste para $\Delta z=0,40mm$ posicionado no nível baixo (-1) e, no gráfico da FIGURA 147, o contraste para $\Delta z=0,80mm$ fixado no nível alto (+1). Cabe ressaltar que o valor de R^2 também é muito bom e maior que 0,96 para todas as situações. Infere-se ainda que a variação na força Fz_pico , quando alterado apenas o incremento em z, “ Δz ”, e mantendo-se todos os demais parâmetros fixos tende a ser a mesma para ambos os contrastes, algo em torno de 66%, nesse caso. Notoriamente um apontamento na direção da linearidade do fator mais importante que a definição do comportamento, é poder indicar que, reduzindo os valores do incremento em z, tende-se, nessa configuração, a

aumentar a profundidade de estampagem da chapa. Esse aspecto, com certeza, deve ser estudado nos próximos trabalhos.

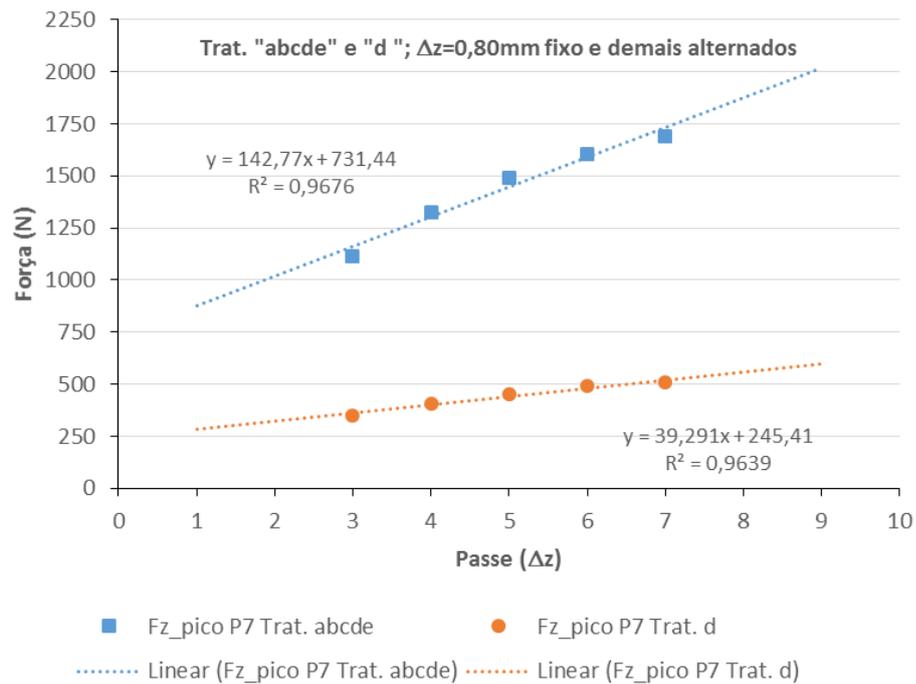
A seguir, apontam-se as referidas indicações produzidas pela análise das informações estatísticas para o fator “ Δz ”:

- Pode ser considerado comportamento linear o modelo de regressão para o fator “ Δz ”;
- A inclinação da equação linear, quando todos os demais fatores estão posicionados no nível inferior (-1), é bem menor do que aquela observada quando todos os outros fatores estão posicionados no nível superior (+1), tanto para $\Delta z=0,40\text{mm}$ quanto para $\Delta z=0,80\text{mm}$, isto é, constata-se a possibilidade de combinar os fatores e minimizar as cargas mesmo com incrementos em z maiores e, sobretudo, nesse sentido, atingir profundidades de conformação bem maiores (extrapolação das curvas na direção dos pontos 9 e 10);
- Porém, quando todos os demais fatores estão fixos no patamar alto (+1), a força máxima Fz_pico cresce aceleradamente, logo, não é recomendável essa configuração.

FIGURA 146 - GRÁFICO DE CONTRASTE DOS NÍVEIS COM INCREMENTO Z EM (-1), $\Delta Z=0,40\text{MM}$.



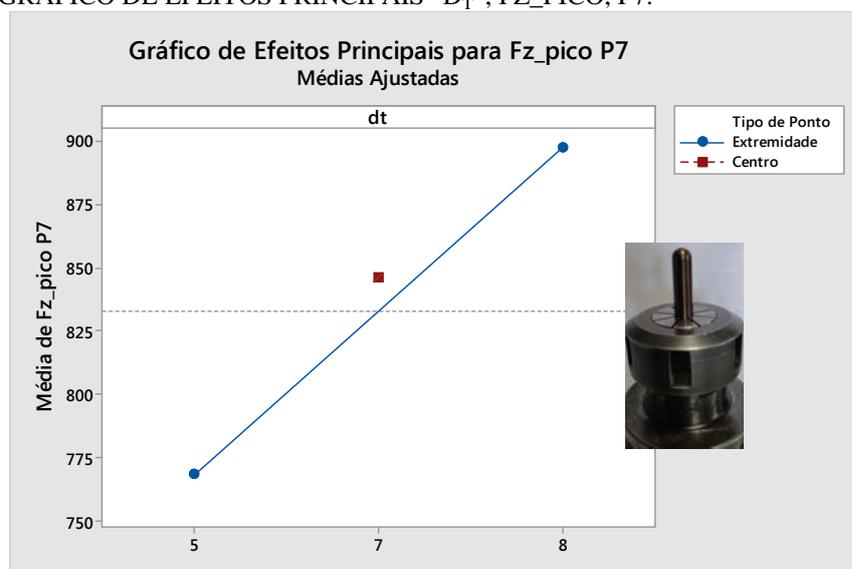
FONTE: O autor.

FIGURA 147 - GRÁFICO DE CONTRASTE DOS NÍVEIS COM INCREMENTO Z EM (+1), $\Delta Z=0,80\text{MM}$.

FONTE: O autor.

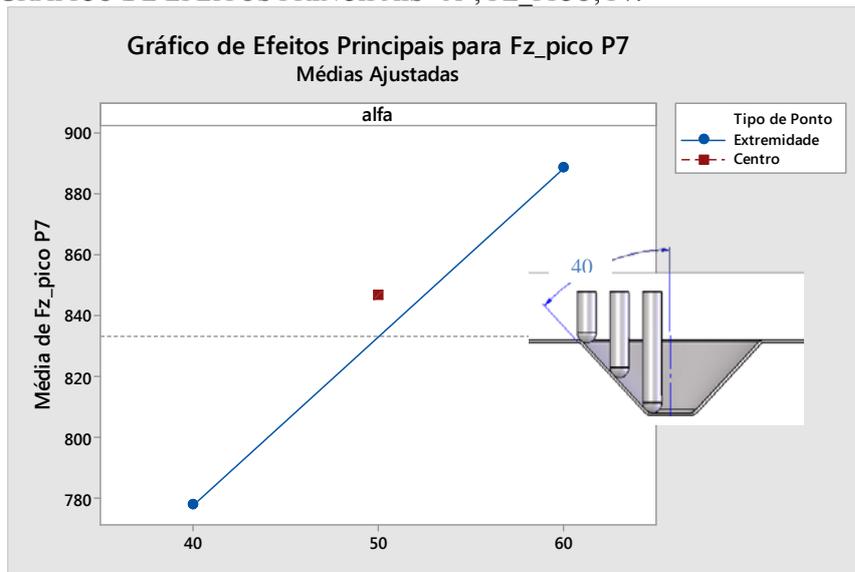
6.4 INFLUÊNCIA DO DIÂMETRO DO PUNÇÃO D_T E DO ÂNGULO DE PAREDE A

Nos gráficos da FIGURA 148 e FIGURA 149 têm-se um retrato muito similar do comportamento dos efeitos principais para o diâmetro do punção " d_t " e para o ângulo de inclinação da parede " α ".

FIGURA 148 - GRÁFICO DE EFEITOS PRINCIPAIS " D_T ", FZ_PICO, P7.

FONTE: O autor.

FIGURA 149 - GRÁFICO DE EFEITOS PRINCIPAIS “A”, FZ_PICO, P7.

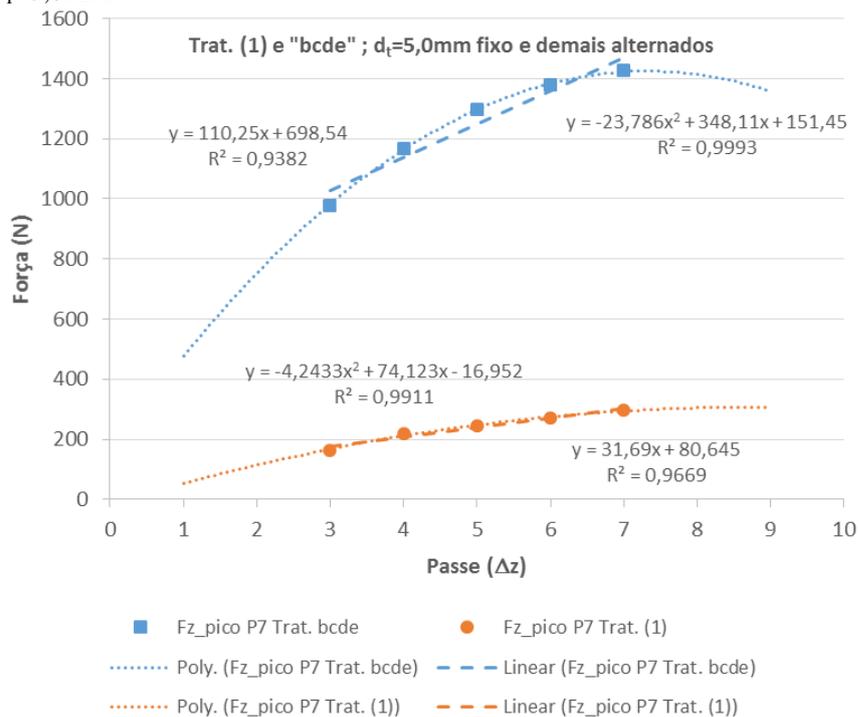


FONTE: O autor.

Infere-se a tendência de que, tanto a variável diâmetro do punção, quanto a variável ângulo da parede possam ter um comportamento de 2ª ordem, ou seja, o modelo estatístico quadrático.

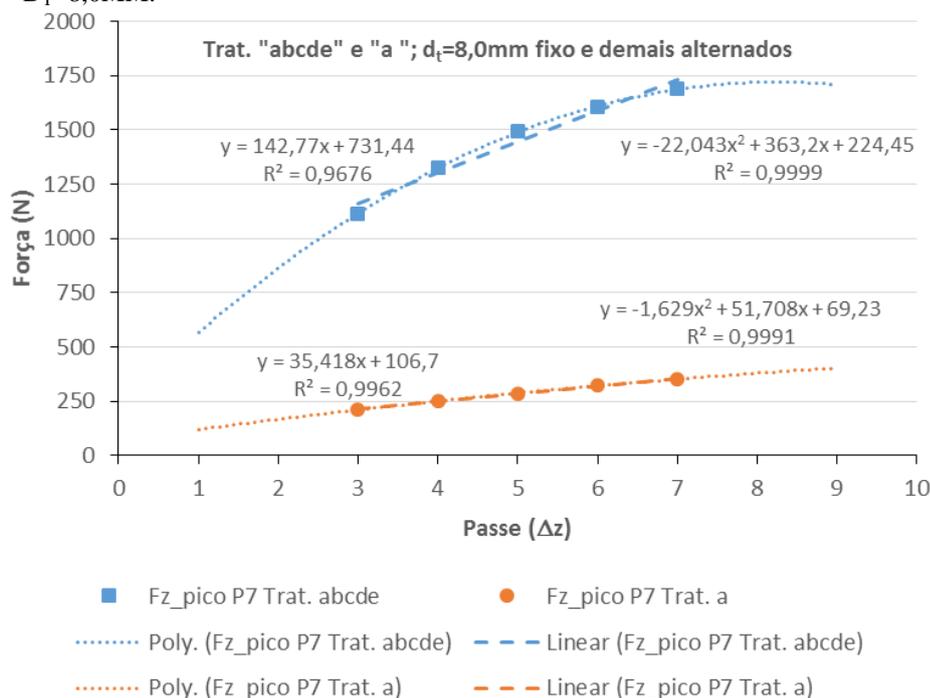
Logo, nos gráficos a seguir, têm-se os respectivos contrastes e, na sequência, as devidas deduções.

FIGURA 150 - GRÁFICO DE CONTRASTE DOS NÍVEIS COM DIÂMETRO DO PUNÇÃO EM (-1), $D_T=5,0\text{MM}$.



FONTE: O autor.

FIGURA 151 - GRÁFICO DE CONTRASTE DOS NÍVEIS COM DIÂMETRO DO PUNÇÃO EM (+1), $D_T=8,0\text{MM}$.



FONTE: O autor.

Em relação ao diâmetro do punção, constata-se que o valor de R^2 na configuração ajustada para " d_t " no nível baixo (-1) e para os demais fatores no nível alto (+1), está em torno de 0,93 quando da regressão linear, ou seja, pela própria curvatura observada na FIGURA 150, pode-se verificar que a tendência mais favorável para esse fator é a regressão polinomial de 2ª ordem, onde R^2 está em 0,99. Esse aspecto é corroborado pelo gráfico de efeitos principais, FIGURA 148, que destaca o ponto central da análise, sugerindo o respectivo comportamento não-linear da variável " d_t ". Outra característica importante em termos de diâmetro da ferramenta é a geometria final da peça a ser obtida, já que o menor raio presente no projeto da peça estabelece o diâmetro do punção necessário para a respectiva impressão da forma almejada. Logo, o parâmetro diâmetro do punção também é influenciado pelas especificações de forma oriundas do projeto mecânico do produto, limitando, dessa maneira, as dimensões possíveis de utilização. Não obstante, em termos de resistência mecânica da ferramenta, quanto maior o diâmetro, melhor e mais robusta torna-se a ferramenta e, conseqüentemente, mais abrangente será a área de contato entre o punção e a chapa nesse sentido. Um fenômeno crítico que deve também ser monitorado é a relação comprimento em balanço do punção e o seu diâmetro, pois vibrações podem surgir no caso de grandes relações, fragilizando eventualmente a própria ferramenta, bem como impregnando

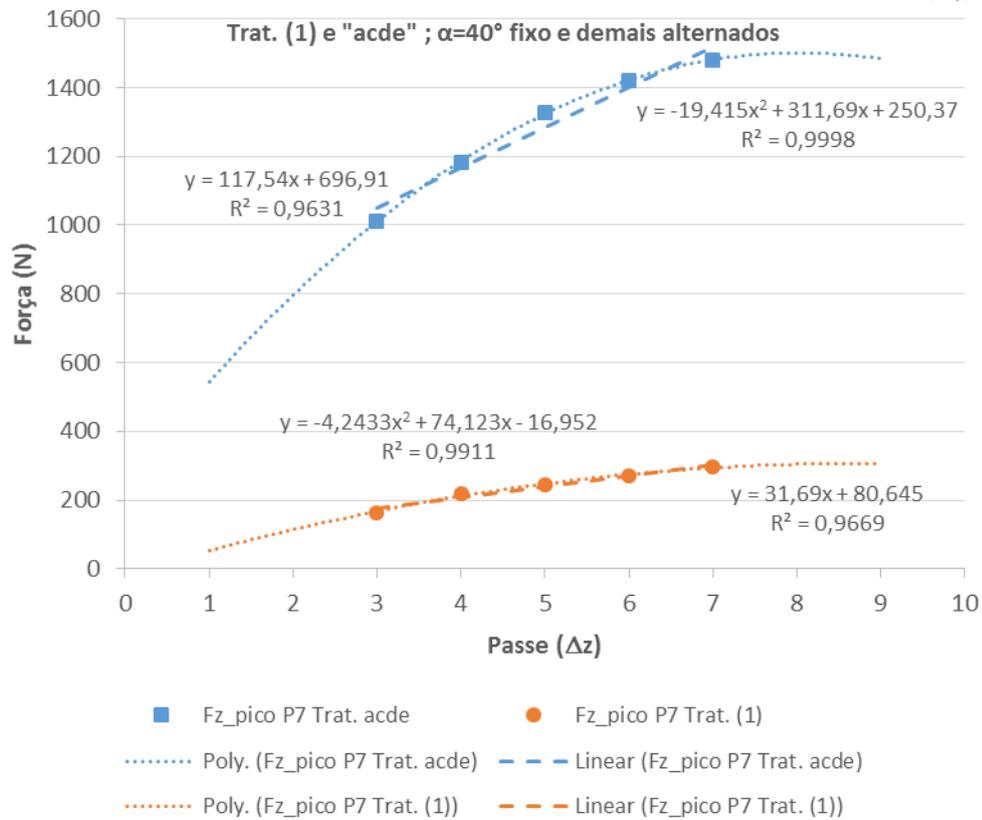
danos à chapa estampada. Isto posto, a seguir, destacam-se as referidas inferências produzidas pela análise das informações estatísticas para o fator “ d_t ”:

- a) Pode ser considerado comportamento não-linear o modelo de regressão para o fator “ d_t ”;
- b) O aumento no diâmetro do punção não representa grandes incrementos na magnitude das forças máximas Fz_pico quando as demais variáveis são mantidas constantes;
- c) O incremento no valor das forças Fz_pico no decorrer dos passes tende a se estabilizar. Todavia, nas condições onde todas as demais variáveis estão posicionadas no patamar inferior, nível baixo (-1), esse incremento é nitidamente mais leve do que aquele observado quando os demais parâmetros estão posicionados no nível alto (+1).

No que diz respeito ao ângulo de inclinação “ α ”, parâmetro de projeto, tem-se a mesma percepção estatística descrita para o diâmetro do punção “ d_t ”, pois ambos os fatores apresentam semelhante fotografia em termos de curvatura nos respectivos contrastes e gráficos de efeitos principais: FIGURA 149, FIGURA 152 e FIGURA 153, no caso de “ α ”; e FIGURA 148, FIGURA 150 e FIGURA 151 no caso de “ d_t ”. A seguir, citam-se as referidas inferências produzidas pela análise das informações estatísticas para o fator “ α ”:

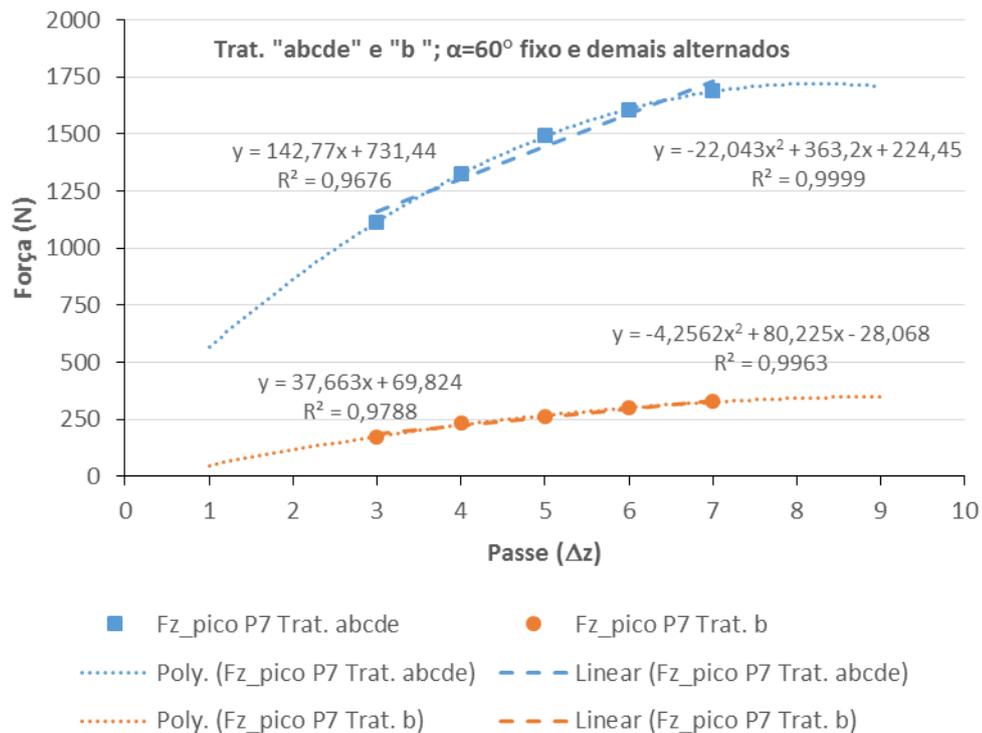
- a) Pode ser considerado comportamento não-linear o modelo de regressão para o fator “ α ”;
- b) O aumento no ângulo de parede não representa grandes incrementos na magnitude das forças máximas Fz_pico quando as demais variáveis são mantidas constantes;
- c) O incremento no valor das forças Fz_pico no decorrer dos passes tende a se estabilizar.

FIGURA 152 - GRÁFICO DE CONTRASTE DOS NÍVEIS COM ÂNGULO DE PAREDE EM (-1), A=40°.



FONTE: O autor.

FIGURA 153 - GRÁFICO DE CONTRASTE DOS NÍVEIS COM ÂNGULO DE PAREDE EM (+1), A=60°.



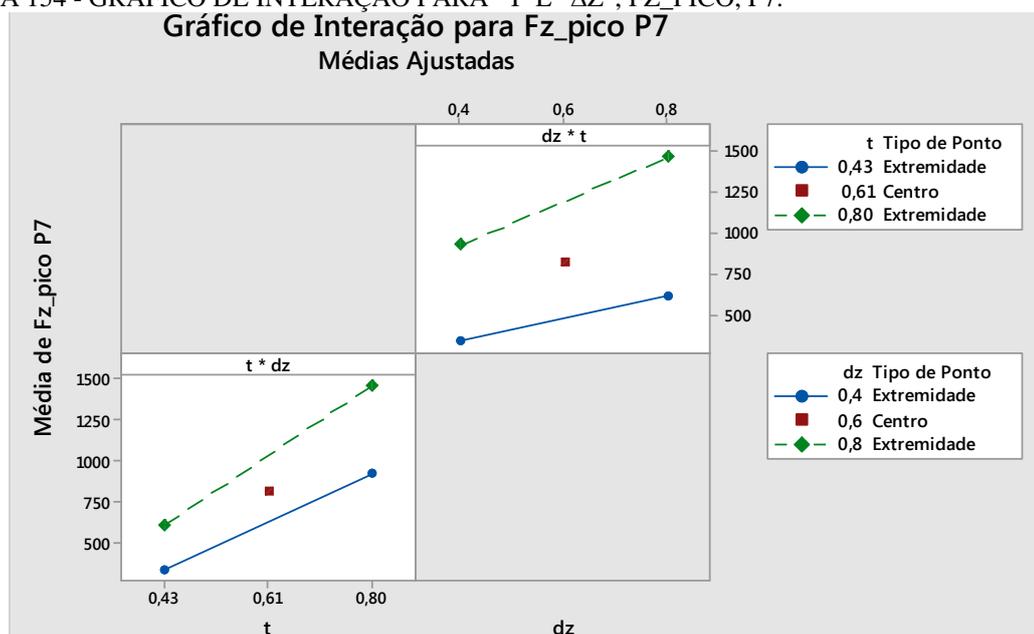
FONTE: O autor.

6.5 INFLUÊNCIA DA INTERAÇÃO ESPESSURA DA CHAPA T E INCREMENTO ΔZ

Analisando o gráfico de interação das variáveis “t” e “ Δz ”, FIGURA 154, percebe-se a influência que ambos os fatores têm sobre a força máxima Fz_pico . Conforme discutido no item 6.3, referidos fatores podem ser considerados modelos de regressão com ajustamento linear passíveis de otimização, naturalmente. Todavia, a espessura da chapa é parâmetro basicamente de projeto, não se descartando, obviamente, a possibilidade de uma engenharia colaborativa no momento de especificação da chapa do produto final a ser estampado. Entretanto, nesse estágio da pesquisa, julga-se prudente aceitar a premissa de que a espessura da chapa é definida pela área de projeto do produto.

Desse modo, tendo o material e a dimensão da espessura da chapa pré-definidos, torna-se, então, fundamental, a minimização dos esforços para a conseguinte viabilidade do uso do centro de usinagem CNC no processo de estampagem incremental (ISF) em curso. Nesse cenário, assume-se também que o sistema de fixação da chapa é possível dentro dos limites da mesa da máquina e, sobretudo, adequado para a necessária pressão de fixação. Isto é, tem-se exclusivamente o fator “ Δz ” passível como parâmetro a ser ajustado para minimizar as cargas de deformação. Avaliando o respectivo gráfico de interação, constata-se que o crescimento dos esforços de conformação não é proporcional para os 2 fatores, ou seja, a função que representa o modelo “ Δz ” é menos sensível do que a que representa o parâmetro “t”.

FIGURA 154 - GRÁFICO DE INTERAÇÃO PARA “T”E “ ΔZ ”, FZ_PICO, P7.



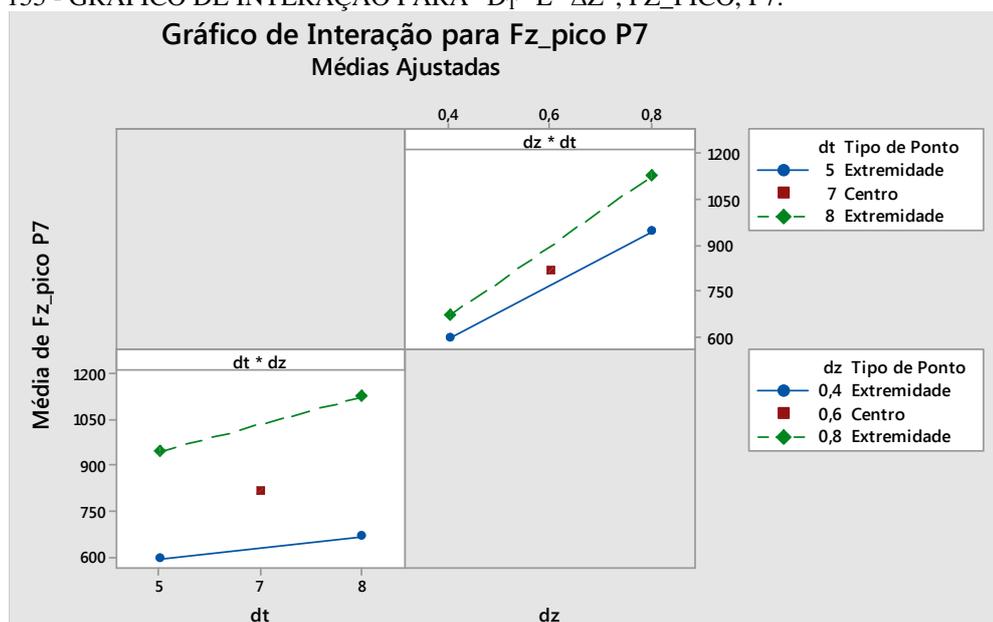
FONTE: O autor.

Assim sendo, o impacto no aumento dos esforços Fz_pico decorrente do crescimento de “ Δz ” é menor que o impacto em virtude do eventual incremento da espessura “ t ” da chapa, o que significa que, ao se aumentar a espessura da chapa, não se pode aumentar, na mesma proporção, o incremento em z para o processo, sob pena de se ultrapassar os limites de resistência do conjunto. Isto posto, verifica-se que a interação “ t ” e “ Δz ” é significativa, e que o fator espessura da parede impõe o máximo incremento em z possível de ser aplicado na referida combinação, limitando, conseqüentemente, a profundidade máxima de conformação da chapa, que é diretamente proporcional ao fator “ Δz ”. Por fim, é nítido que, para menores quantidades de incremento em z , menores serão as cargas geradas no processo, assim como que ambas as regressões lineares estão próximas com o ponto central razoavelmente equilibrado.

6.6 INFLUÊNCIA DA INTERAÇÃO $D_T * \Delta Z$, $A * \Delta Z$, $A * T$ E $D_T * T$

Na FIGURA 155 tem-se o gráfico de interação dos fatores “ d_t ” e “ Δz ” e, quanto a isso, destaca-se, primeiramente, a larga diferença observada em favor do incremento em z . Resta nítido que a variação na força Fz_pico é bem mais sensível em relação ao fator “ Δz ” do que aquela observada em relação ao fator “ d_t ”. Desse modo, na medida em que se necessita reduzir o diâmetro do punção e aumentar a espessura da chapa o maior impacto no processo será, em especial, decorrente da espessura.

FIGURA 155 - GRÁFICO DE INTERAÇÃO PARA “ D_T ” E “ ΔZ ”, FZ_PICO , P7.

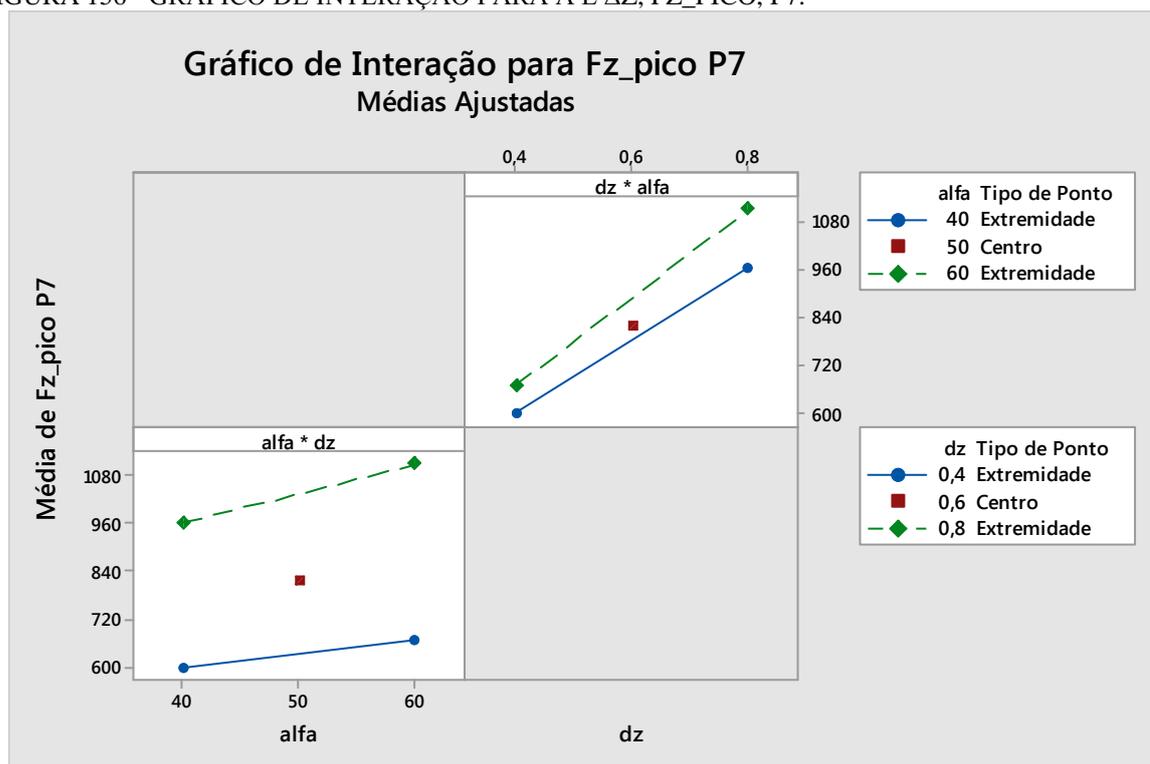


FONTE: O autor.

Sendo assim, verifica-se um aspecto favorável no que diz respeito à utilização de pequenos diâmetros de ferramentas para a conformação de raios pequenos nas peças, uma vez que, porquanto a redução do diâmetro da ferramenta não implica no aumento significativo das forças, por outro lado, essa redução pode sobrecarregar os esforços sofridos pelo próprio punção e, eventualmente, proporcionar a ruptura do mesmo.

Aqui, novamente, na FIGURA 155, infere-se o impacto do fator “ Δz ” na força máxima Fz_pico , de maneira que, nessa interação, caso ocorra a combinação de aumento do diâmetro da ferramenta com o aumento do passe em z, a força crescerá vertiginosamente. Lembrando que o diâmetro do punção é decorrente também da geometria final do produto. Nesse cenário, opta-se, claramente, pela maximização do diâmetro da ferramenta até o limite imposto pelo projeto e, por outro lado, a minimização do incremento em z. Prefere-se trabalhar com grandes diâmetros e mínimos passes em z.

FIGURA 156 - GRÁFICO DE INTERAÇÃO PARA A E ΔZ , FZ_PICO , P7.



FONTE: O autor.

A FIGURA 156 acima traz o gráfico de interação dos fatores “ α ” e “ Δz ”, o qual, notoriamente, é parecido com o discutido no parágrafo anterior, uma vez que, na medida em que se aumenta o ângulo de parede “ α ”, verifica-se, concomitantemente, um suave aumento

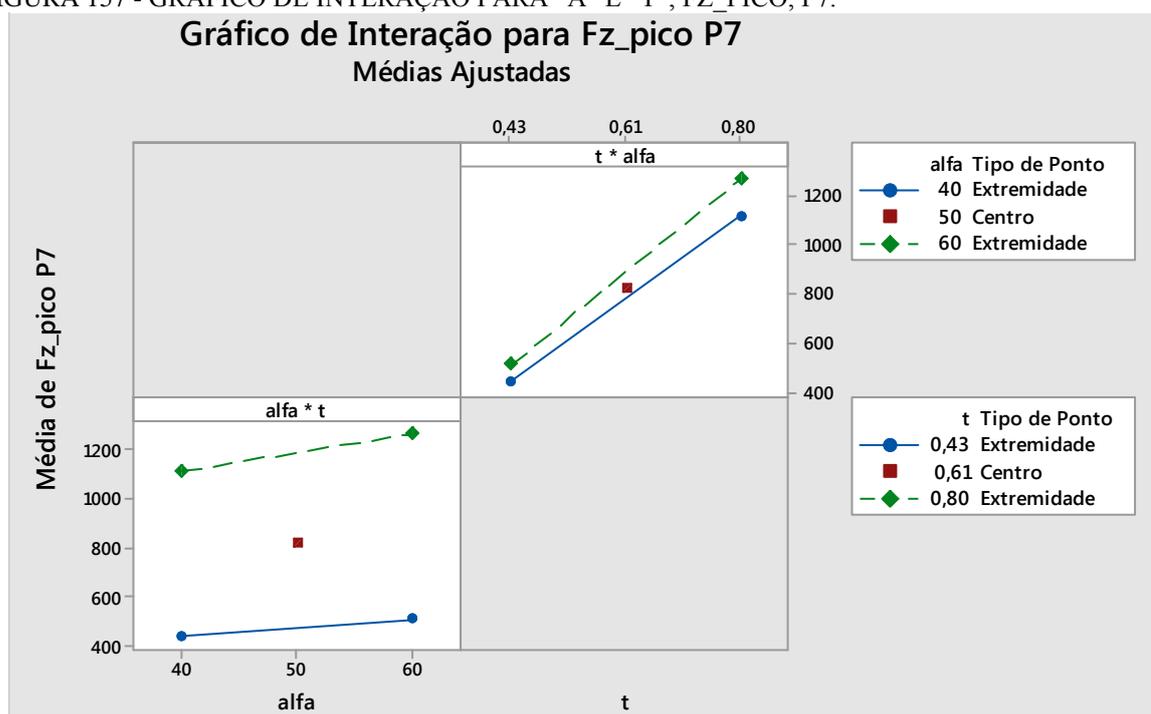
da força Fz_pico enquanto que, na medida em que cresce o incremento em z , " Δz " ocorre, simultaneamente, um significativo aumento na força Fz_pico . Cabe destacar que o ângulo de parede " α " também é uma característica oriunda de projeto, já que diz respeito à geometria final do produto. Desse modo, o fenômeno observado nesse gráfico corrobora com o observado no gráfico da FIGURA 155. Nesse cenário, opta-se, claramente, pela maximização do ângulo de parede " α " até o limite imposto pelo projeto e, por outro lado, a minimização do incremento em z , preferindo-se trabalhar com grandes ângulos e mínimos passes em z . Lembrando que essa opção pode limitar a profundidade de estampagem, sendo assim, há uma relação de compromisso que deve ser levada em consideração caso a caso.

Na FIGURA 157 e FIGURA 158, que mostram os gráficos de interação dos fatores " α " e " t ", e " d_t " e " t " encontram-se comportamentos similares para os 2 casos. Entretanto, nesse momento, o ângulo de parede do produto, o diâmetro do punção e, em especial, a espessura da chapa, são fatores decorrentes e influenciados pelas especificações de projeto, conforme discutido anteriormente. Sendo assim, a margem de manipulação dos parâmetros torna-se estreita, uma vez que esta situação não pode ser facilmente alterada em termos de engenharia simultânea. Todavia, tanto o ângulo de parede " α " quanto o diâmetro do punção " d_t " apresentam suave influência no incremento das cargas monitoradas e, por outro lado, o aumento da espessura da chapa acarreta forte aumento das forças Fz_pico de deformação presentes no processo de estampagem incremental de chapas (ISF).

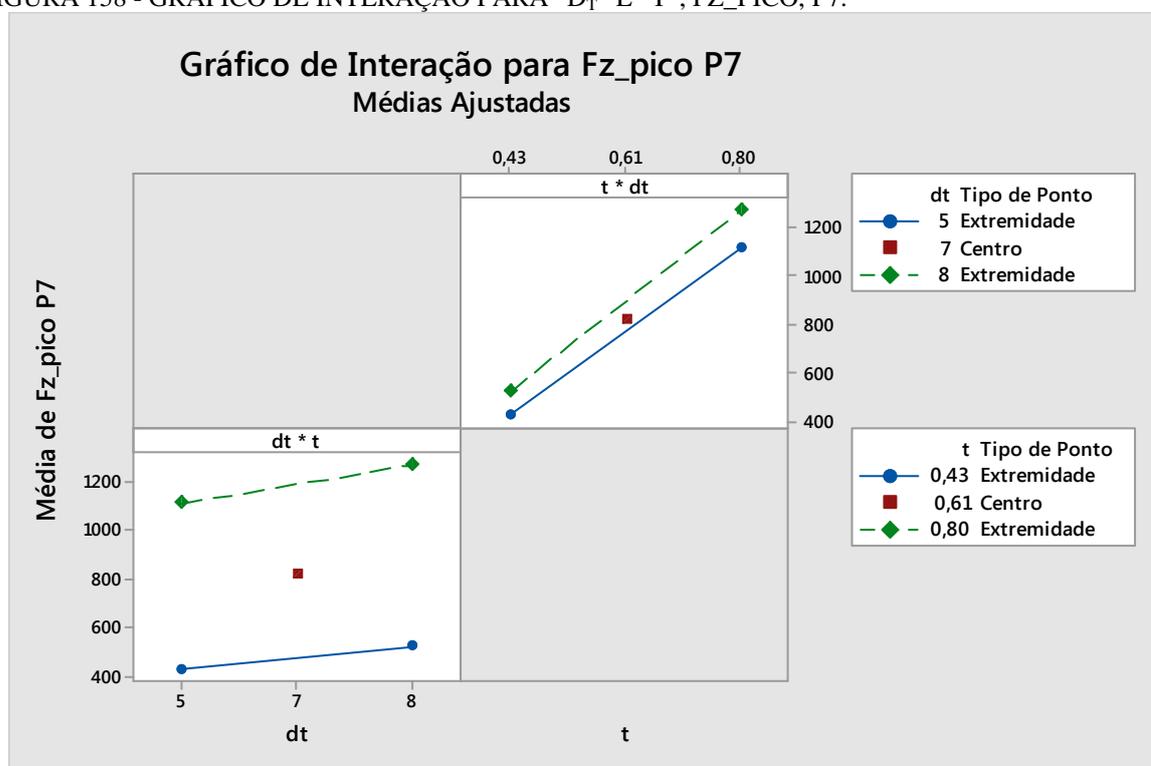
Entretanto, já é esperado esse incremento nas forças na medida em que a espessura de parede cresce e, ademais, essa influência também tem forte relação com as próprias propriedades do material, ou seja, os valores presentes na expressão analítica da equação de Hollomon, quando o material está em regime plástico, com certeza impõem os limites tecnológicos do processo no que se refere aos esforços de conformação incremental utilizando centro de usinagem CNC.

Isto posto, verifica-se que o fator espessura da chapa " t " é o parâmetro de maior influência nas cargas de conformação e, como tal fator é decorrente da área de projeto do produto, torna-se, ademais, condição *sine qua non* a minimização dos esforços produzidos por intermédio das outras variáveis de processo, sobretudo otimizando " Δz ". Por fim, na medida do possível, deve-se procurar influenciar a área de desenvolvimento e pesquisa de produto com essas informações tecnológicas que proporcionam ganhos em termos de sustentabilidade econômica, ambiental e social.

FIGURA 157 - GRÁFICO DE INTERAÇÃO PARA “A” E “T”, FZ_PICO, P7.



FONTE: O autor.

FIGURA 158 - GRÁFICO DE INTERAÇÃO PARA “D_T” E “T”, FZ_PICO, P7.

FONTE: O autor.

6.7 MODELO DE REGRESSÃO

Após as análises correspondentes aos fatores individuais e às interações significativas, tem-se, oportunamente, a devida determinação do cálculo estatístico do modelo de regressão que melhor representa o fenômeno sob investigação. Cabe destacar que a expressão desta função pretende responder, em especial, à questão problema proposta pela pesquisa científica em curso. Assim sendo, observa-se, a seguir a equação completa oriunda da análise DOE fatorial 2⁵ e que exprime o termo Fz_pico no passe 7 em função do modelo completo.

$$\begin{aligned}
 \text{Fz_pico P7} = & -3076 + 371 \text{ dt} + 53,9 \text{ alfa} + 4639 \text{ t} + 5650 \text{ dz} + 20,2 \text{ f} - 7,4 \text{ dt*alfa} - 454 \text{ dt*t} \\
 & - 635 \text{ dt*dz} - 2,63 \text{ dt*f} - 81 \text{ alfa*t} - 107 \text{ alfa*dz} - 0,390 \text{ alfa*f} - 6732 \text{ t*dz} \\
 & - 28,7 \text{ t*f} - 41,2 \text{ dz*f} + 10,2 \text{ dt*alfa*t} + 12,0 \text{ dt*alfa*dz} + 0,0521 \text{ dt*alfa*f} \\
 & + 754 \text{ dt*t*dz} + 3,47 \text{ dt*t*f} + 4,74 \text{ dt*dz*f} + 162 \text{ alfa*t*dz} + 0,613 \text{ alfa*t*f} \\
 & + 0,754 \text{ alfa*dz*f} + 54,5 \text{ t*dz*f} - 14,7 \text{ dt*alfa*t*dz} - 0,077 \text{ dt*alfa*t*f} \\
 & - 0,088 \text{ dt*alfa*dz*f} - 5,64 \text{ dt*t*dz*f} - 1,12 \text{ alfa*t*dz*f} + 0,122 \text{ dt*alfa*t*dz*f} \\
 & + 58,72 \text{ Pt Ct}
 \end{aligned}$$

(Equação 11)

Todavia, uma vez descartadas as interações não significativas, bem como o fator avanço “f”, que também se mostrou não significativo nesse arranjo experimental, tem-se, por conseguinte, na EQUAÇÃO 11, o modelo matemático final que representa o comportamento da força máxima Fz_pico no passe 7, com suas respectivas variáveis independentes, e o erro associado à mesma. Ressalta-se que os parâmetros, fatores puros e interações estão atribuídos, nessa função matemática, com base nos seus respectivos valores efetivos de processo, ou seja, nesse caso, para se predizer o valor da força Fz_pico, deve-se apenas substituir os devidos fatores pela combinação do ponto desejado e, assim sendo, estimar o valor estatístico da carga Fz_pico com base no modelo da análise regressão, onde, para os 9 termos significativos, tem-se a seguinte função e seu erro associado:

$$\begin{aligned}
 \text{Fz_pico P7} = & -3076 + 371 \text{ dt} + 53,9 \text{ alfa} + 4639 \text{ t} + 5650 \text{ dz} - 454 \text{ dt*t} \\
 & - 635 \text{ dt*dz} - 81 \text{ alfa*t} - 107 \text{ alfa*dz} - 6732 \text{ t*dz}
 \end{aligned}$$

(Equação 12)

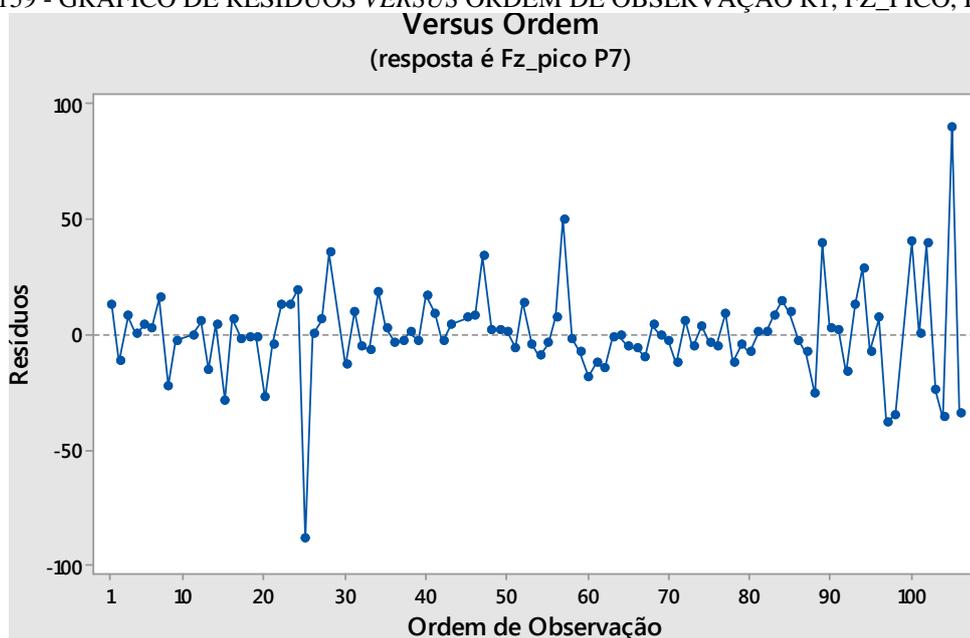
Contudo, antes de assumir a respectiva equação como modelo matemático estimado válido, torna-se fundamental avaliar o comportamento dos resíduos, verificando se estes possuem média aritmética igual a zero e, em especial, distribuição normal, sendo que o teste

selecionado para avaliar a normalidade dos resíduos é o Shapiro-Wilk, automaticamente aplicado pelo ambiente Minitab V17.

6.8 ANÁLISE RESIDUAL

Nesse contexto, no intuito de validar o modelo estatístico proposto para essa pesquisa, faz-se, nesse instante, a devida análise residual do arranjo experimental conduzido e, como primeiro gráfico, a distribuição da ordem de observações exposta na figura a seguir:

FIGURA 159 - GRÁFICO DE RESÍDUOS *VERSUS* ORDEM DE OBSERVAÇÃO R1, FZ_PICO, P7.



FONTE: O autor.

Na FIGURA 159 há, aparentemente, distribuição normal dos resíduos ao longo da ordem de observação e, aqui, destacam-se, numa primeira rodada de análise, 3 *outliers* atípicos: os pontos 25, 57 e 105. Registra-se, ademais, que ocorreram 4 falhas entre os 106 testes conduzidos, ou seja, constata-se 102 observações na corrida. Na TABELA 41, verificam-se os respectivos pontos atípicos quando comparados com as suas repetições e, não obstante, detectam-se, claramente, as diferenças na ordem de grandeza. Importante ressaltar que as observações 25 e 57 fazem parte do mesmo subgrupo de repetições na combinação (-1, -1, -1, +1, +1).

Na FIGURA 160 tem-se a fotografia da dispersão dos resíduos ao longo da faixa de valores de carga gerada nesse arranjo experimental e, por assim, observam-se os 3 *outliers* atípicos indicados pelo DOE. No APÊNDICE D, encontra-se todo o descritivo.

TABELA 41 - COMPARAÇÃO DOS 3 *OUTLIERS* COM AS RESPECTIVAS REPETIÇÕES EXPERIMENTAIS.

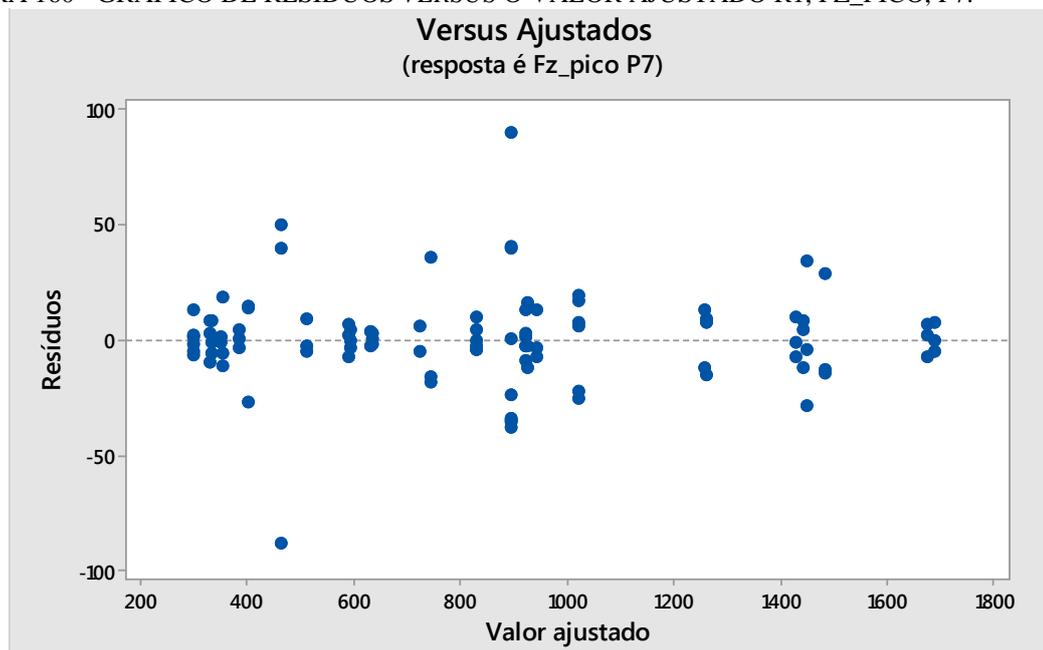
CP25	CP57	CP89	CP104	CP105	CP106
95,70	85,94	79,10	262,70	303,72	267,58
261,72	250,00	245,12	426,76	478,52	434,58
350,58	356,44	345,70	559,58	621,10	565,42
412,10	406,26	399,42	665,04	726,56	669,92
461,92	455,08	444,34	746,10	834,96	744,14
493,16	490,24	483,40	811,52	923,82	810,54
370,12	508,78	498,04	855,46	981,44	857,42

(a)

(b)

FONTE: O autor.

FIGURA 160 - GRÁFICO DE RESÍDUOS *VERSUS* O VALOR AJUSTADO R1, FZ_PICO, P7.



FONTE: O autor.

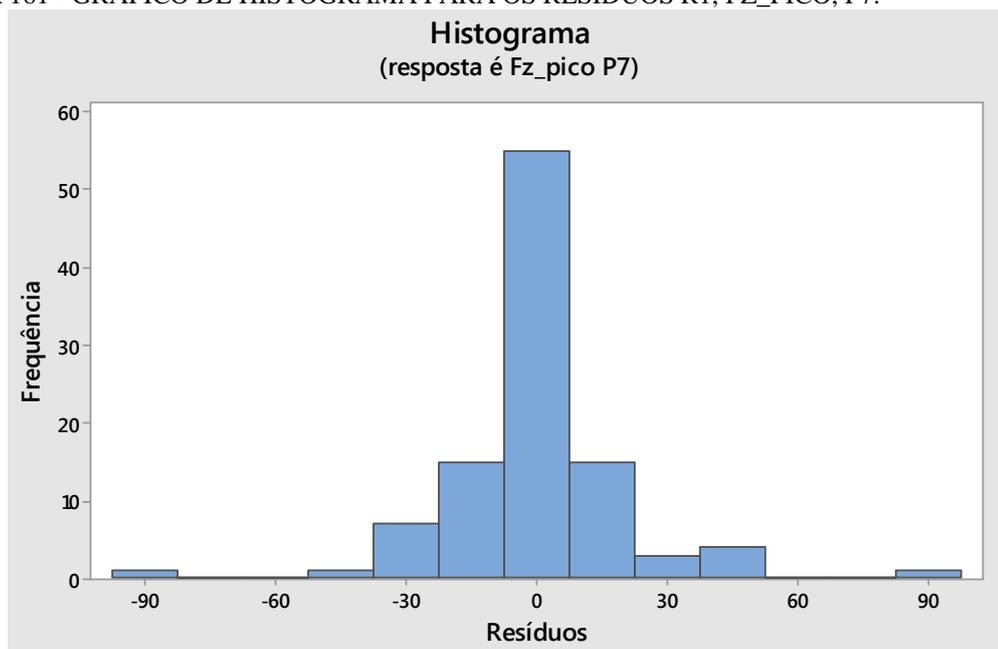
Nota-se também uma possível existência de outros ruídos atípicos, todavia, essa análise será conduzida na sequência, quando do teste de hipótese adequado.

Essas perturbações no sinal ruído podem ser decorrentes de eventos externos ou até mesmo de eventual ajuste inadequado no teste pontual, todavia, não comprometem a análise

DOE fatorial realizada, uma vez que, segundo Ryan 2009, espera-se, geralmente, algo em torno de até 5% de falhas nos ensaios desse tipo sem o comprometimento das inferências e modelagem de regressão.

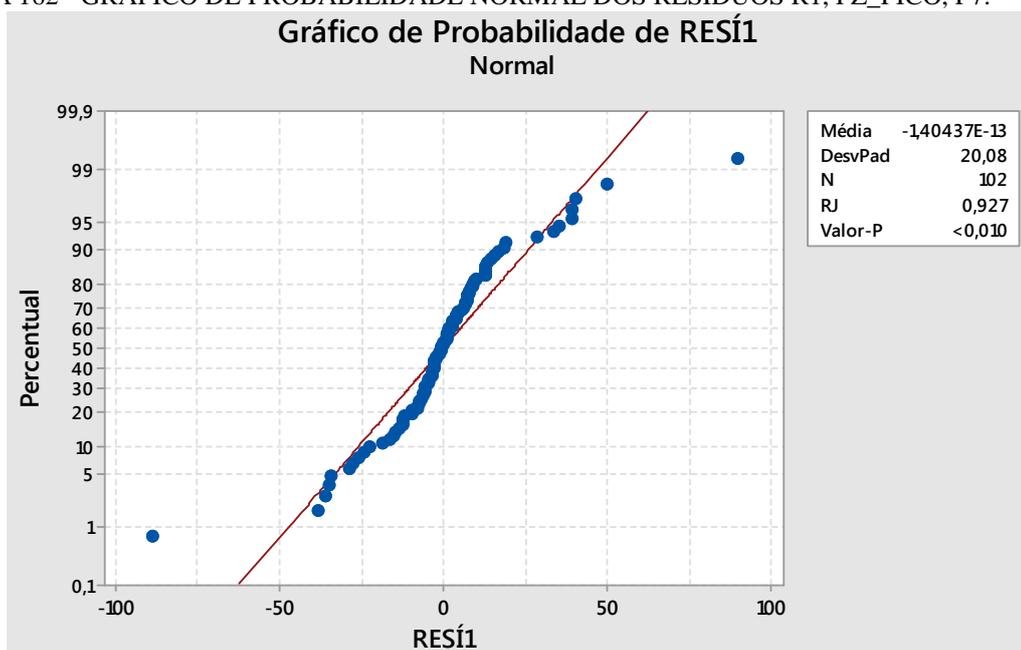
A FIGURA 161 traz o gráfico do histograma da distribuição dos resíduos nessa primeira rodada e, aparentemente, verifica-se uma distribuição normal. Contudo, essa sensação deve ser comprovada estatisticamente por algum teste que avalie a respectiva normalidade. Desse modo, com o objetivo de validar estatisticamente a referida distribuição normal aplicou-se, na sequência, o teste Shapiro-Wilk para a devida confirmação sendo que, no APÊNDICE D, encontram-se os referidos dados para essa primeira rodada. Desse modo, o teste rejeitou a hipótese nula, indicando que os resíduos não apresentam distribuição normal no seu comportamento estatístico, FIGURA 162, uma vez que o *Valor-P* é menor que 0,010 (nível de confiança assumido para o experimento).

FIGURA 161 - GRÁFICO DE HISTOGRAMA PARA OS RESÍDUOS R1, FZ_PICO, P7.



FONTE: O autor.

FIGURA 162 - GRÁFICO DE PROBABILIDADE NORMAL DOS RESÍDUOS R1, FZ_PICO, P7.



FONTE: O autor.

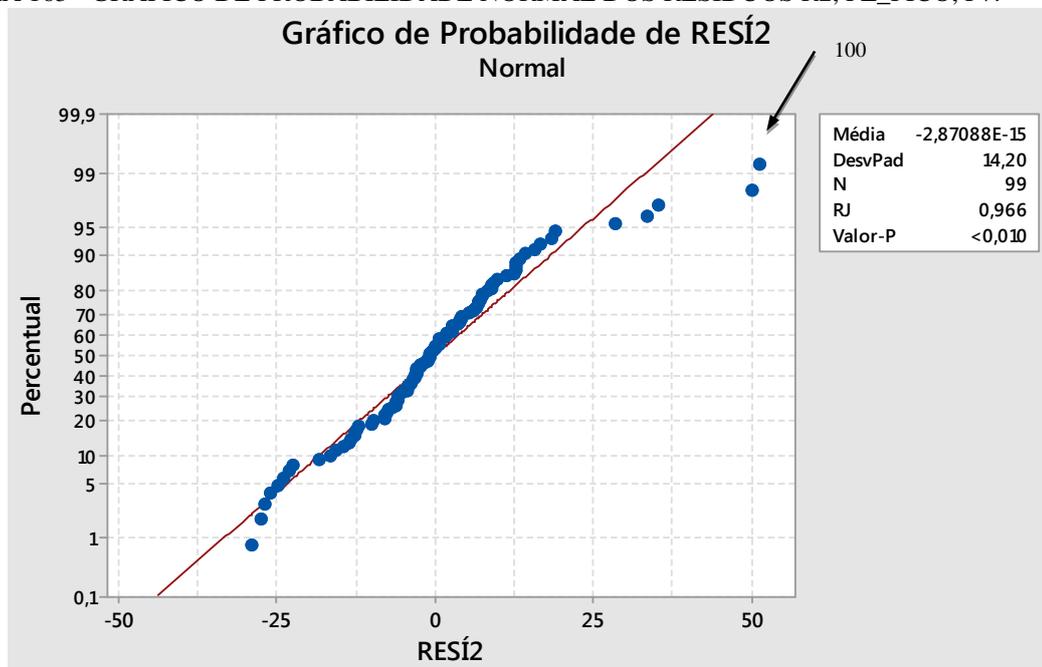
Outra maneira de avaliar a normalidade do sinal ruído está registrada no gráfico de probabilidade normal dos resíduos, FIGURA 162, onde, notoriamente, ocorre uma densa concentração dos pontos ao redor do percentual equivalente a 50%, mas, claramente, a distribuição mostra os pontos 25, 57 e 105, destoando da normalidade. Para tanto, tem-se no quadro ao lado da FIGURA 162, a fotografia da aplicação do teste Shapiro-Wilk e, estatisticamente, verifica-se que o indicador *Valor-P* é menor que o nível de significância assumido nesse trabalho, ou seja, rejeitando-se a hipótese de que os ruídos tenham comportamento normal nesse instante.

Nessa toada, torna-se necessário subtrair os pontos atípicos encontrados nessa primeira rodada de análises visando perseguir a devida validação da normalidade do comportamento do sinal ruído presente no fenômeno sob investigação e, conseqüentemente, aceitar a hipótese nula referente à normalidade dos ruídos e a equação do modelo de regressão que melhor representa a força *Fz_pico*. Portanto, numa segunda rodada de análise do delineamento DOE formatado, excluem-se os dados referentes aos 3 pontos atípicos indicados, anteriormente, sendo os pontos, 25, 57 e 105 e, na sequência, roda-se a análise novamente.

Na FIGURA 163 encontram-se o gráfico de probabilidade normal dessa segunda rodada de análise dos resíduos R2, e o respectivo quadro com a média dos resíduos e o *Valor-P* do teste de hipótese Shapiro-Wilk. Constata-se, outrossim, que a hipótese não foi aceita, de

maneira que se deve continuar a estratégia de purificação dos dados buscando a normalidade do sinal ruído.

FIGURA 163 - GRÁFICO DE PROBABILIDADE NORMAL DOS RESÍDUOS R2, FZ_PICO, P7.



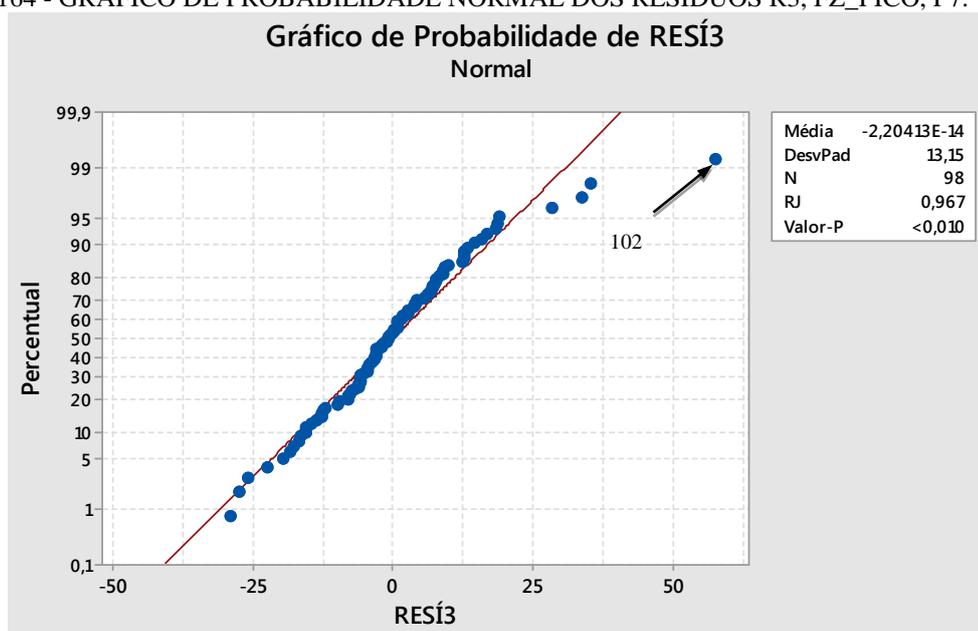
FONTE: O autor.

Nesse estágio, após a segunda avaliação, e observando os valores dos ruídos mais distantes do comportamento normal, optou-se, basicamente, por uma estratégia cautelosa, excluindo-se o valor mais discrepante de ruído e, na sequência, avaliando-se a resposta em termos de normalidade do sinal. Nada mais é que um ciclo simples de retirada do maior ruído observado seguido da análise da normalidade do comportamento do sinal. A intenção é justamente minimizar a quantidade de dados eventualmente excluídos para não deteriorar demasiadamente o arranjo experimental conduzido.

Desse modo, nessa 3ª rodada optou-se por excluir o ponto 100 do arranjo vigente, qual seja, o sinal que apresentou maior discrepância na rodada imediatamente anterior. Desta feita, neste 3º ciclo de análise, restam 98 observações sob investigação.

Adiante, na figura abaixo, encontra-se o resultado do teste de hipótese para as 98 observações combinadas e, novamente, destaca-se que a hipótese nula está rejeitada pelo fato do *Valor-P* continuar menor que 0,010, o que implica, conseqüentemente, num novo ciclo de retirada e avaliação estatística, ou seja, uma quarta rodada DOE.

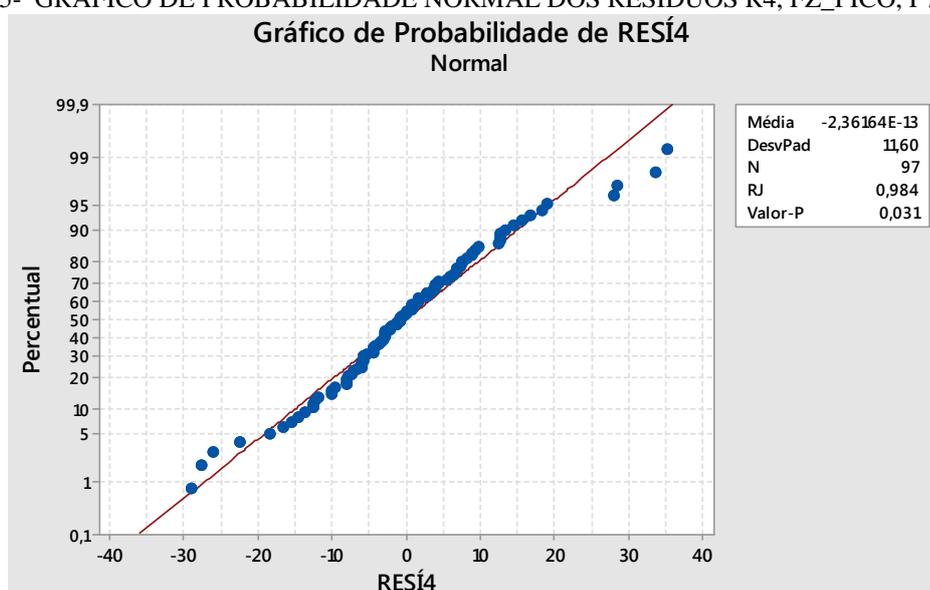
FIGURA 164 - GRÁFICO DE PROBABILIDADE NORMAL DOS RESÍDUOS R3, FZ_PICO, P7.



FONTE: O autor.

Já nessa fase, como procedimento inicial para a próxima rodada, retira-se o sinal mais discrepante entre as 98 observações utilizadas na rodada antecedente. Nessa hipótese, foi retirado o dado número 102, FIGURA 164, restando 97 observações válidas. Feito isso, torna-se possível então aplicar a análise DOE novamente, e produzir o gráfico de probabilidade com a respectiva indicação do *Valor-P*, teste Shapiro-Wilk. Na FIGURA 165 observa-se justamente essa fotografia e, especialmente, evidencia-se que o teste de hipótese foi aceito, uma vez que o *Valor-P* é agora maior que 0,010, mais precisamente 0,031.

FIGURA 165- GRÁFICO DE PROBABILIDADE NORMAL DOS RESÍDUOS R4, FZ_PICO, P7.



FONTE: O autor.

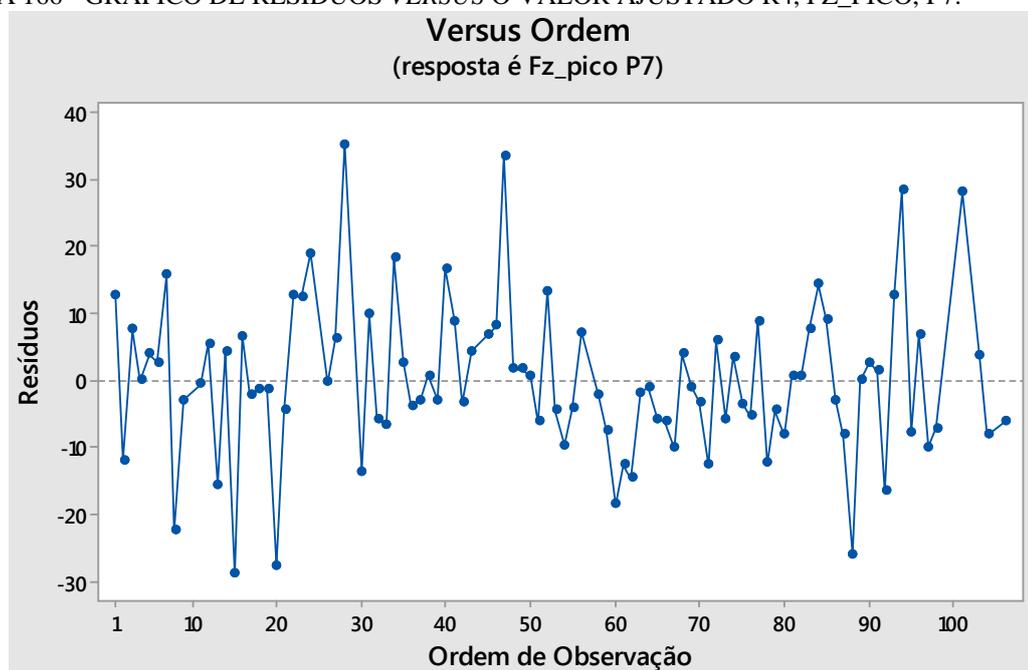
A seguir, aplica-se uma estatística descritiva simples para atestar que a média dos resíduos é nula, assegurando que, além do comportamento normal, os ruídos também apresentam média zero, naturalmente. Abaixo traz-se o quadro com os resultados dessa análise para o último ciclo de convergência dos ruídos.

Na sequência, tem-se a estatística descritiva referente à 4ª rodada de análise dos ruídos.

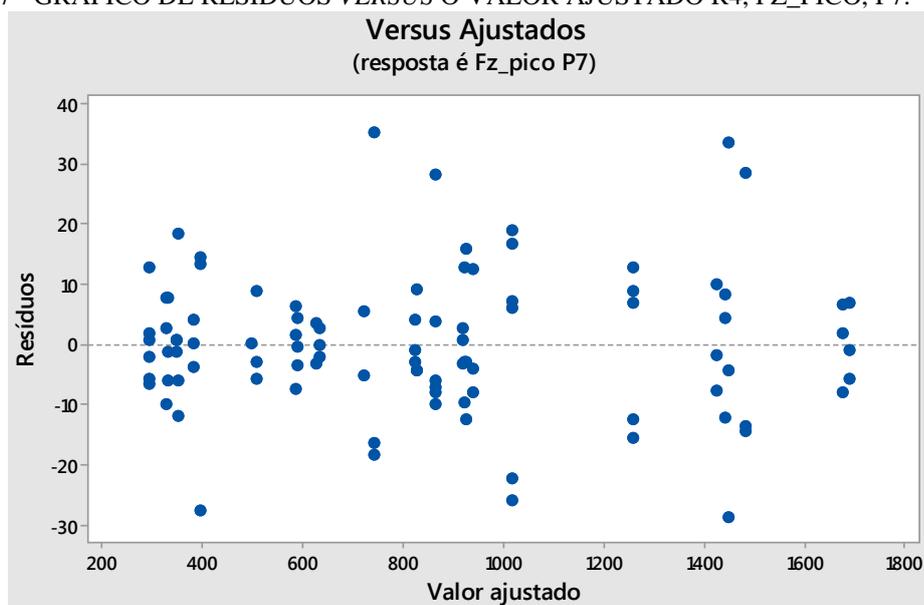
Variável	N	N*	Média	EP	Média	DesvPad	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
RESÍ4	97	9	-0,00		1,18	11,60	-28,97	-6,19	-0,97	6,67	35,15

Uma vez aceita a normalidade dos resíduos, pode-se, então, ratificar os gráficos que trazem a fotografia do comportamento dos resíduos. Logo, na FIGURA 166, tem-se o gráfico de resíduos *versus* o valor ajustado para todas as 97 observações restantes e, ademais, percebe-se uma distribuição uniforme ao longo da abscissa, o que corrobora com a normalidade encontrada.

FIGURA 166 - GRÁFICO DE RESÍDUOS *VERSUS* O VALOR AJUSTADO R4, FZ_PICO, P7.



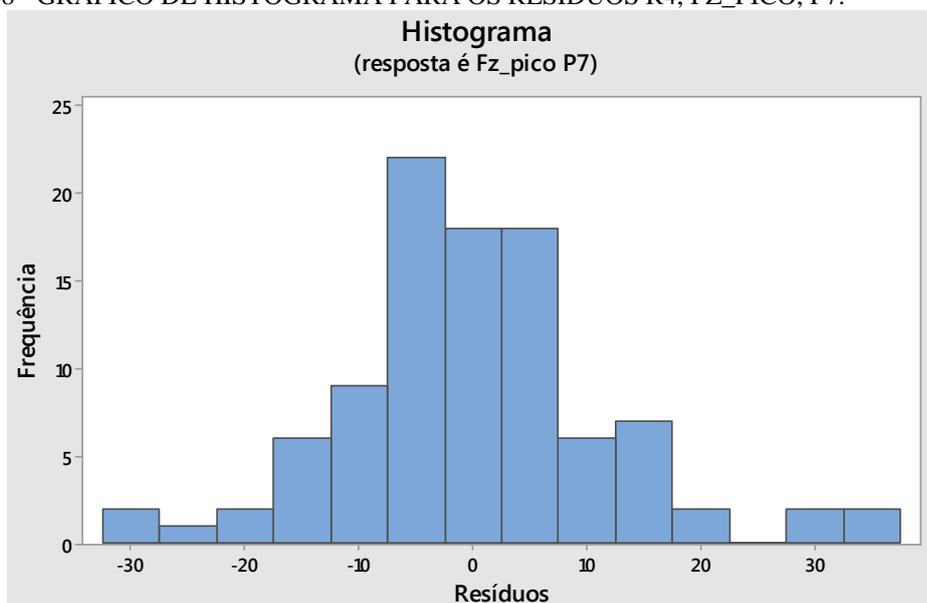
FONTE: O autor.

FIGURA 167 - GRÁFICO DE RESÍDUOS *VERSUS* O VALOR AJUSTADO R4, FZ_PICO, P7.

FONTE: O autor.

O gráfico que apresenta o comportamento dos ruídos ao longo da faixa de valores da variável resposta *Fz_pico* pode ser observado na FIGURA 167 e, assim como os demais nessa quarta rodada, não apresenta tendências ou vícios que possam indicar fragilidade na normalidade associada ao sinal ruído. Por fim, na FIGURA 168, tem-se o histograma clássico das 97 observações restantes num formato razoavelmente homogêneo, sem indicações de falha no teste de normalidade dos ruídos.

FIGURA 168 - GRÁFICO DE HISTOGRAMA PARA OS RESÍDUOS R4, FZ_PICO, P7.



FONTE: O autor.

Isto posto, pode-se corrigir o modelo de regressão que representa o fenômeno sob investigação e, sobretudo, reescrever a equação matemática que traduz o efeito das variáveis independentes na resposta da variável dependente, Fz_pico no passe 7. Essa nova equação está ilustrada a seguir:

$$\begin{aligned} \text{Fz_pico P7} = & -1050 + 117 \text{ dt} + 20,1 \text{ alfa} + 2105 \text{ t} + 583 \text{ dz} + 6,7 \text{ f} - 3,20 \text{ dt*alfa} - 137 \text{ dt*t} \\ & - 1 \text{ dt*dz} - 0,94 \text{ dt*f} - 38,9 \text{ alfa*t} - 22,1 \text{ alfa*dz} - 0,165 \text{ alfa*f} - 398 \text{ t*dz} \\ & - 11,8 \text{ t*f} - 7,5 \text{ dz*f} + 5,0 \text{ dt*alfa*t} + 1,5 \text{ dt*alfa*dz} + 0,0239 \text{ dt*alfa*f} \\ & - 37 \text{ dt*t*dz} + 1,36 \text{ dt*t*f} + 0,52 \text{ dt*dz*f} + 57 \text{ alfa*t*dz} + 0,332 \text{ alfa*t*f} \\ & + 0,191 \text{ alfa*dz*f} + 12,2 \text{ t*dz*f} - 1,5 \text{ dt*alfa*t*dz} - 0,0422 \text{ dt*alfa*t*f} \\ & - 0,0173 \text{ dt*alfa*dz*f} - 0,36 \text{ dt*t*dz*f} - 0,414 \text{ alfa*t*dz*f} \\ & + 0,034 \text{ dt*alfa*t*dz*f} + 29,40 \text{ Pt Ct} \end{aligned}$$

(Equação 13)

Apesar dos ajustes conduzidos visando “normalizar” o comportamento do sinal ruído, registra-se, evidentemente, que os termos significativos ao arranjo experimental em questão continuam os mesmos, ou seja, os 9 termos citados no início desse capítulo. Dessa feita, pode-se, finalmente, reescrever a equação do modelo matemático que expressa a força Fz_pico da seguinte forma: fatores puros e interações significativas mais, o respectivo erro associado. **Essa equação agora pode ser considerada estatisticamente precisa e válida, e está ilustrada na equação 14:**

$$\begin{aligned} \text{Fz_pico P7} = & -1050 + 117 \text{ dt} + 20,1 \text{ alfa} + 2105 \text{ t} + 583 \text{ dz} - 137 \text{ dt*t} \\ & - 1 \text{ dt*dz} - 38,9 \text{ alfa*t} - 22,1 \text{ alfa*dz} - 398 \text{ t*dz} \end{aligned}$$

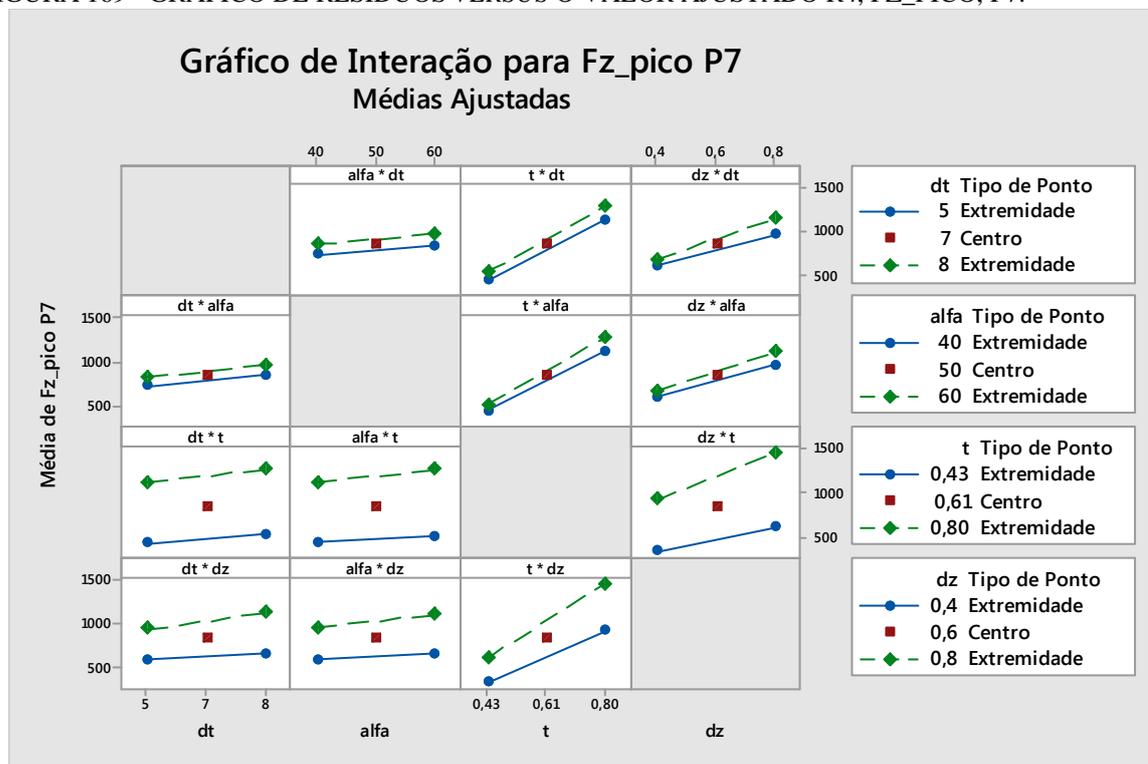
(Equação 14)

Como se vê, a EQUAÇÃO 14 descreve a relação estatística entre os preditores significativos “d_t”, “α”, “t” e “Δz”, e o erro associado ao modelo com a resposta Y da função matemática expressa. Essa função pode predizer a variável resposta, **Fz_pico**, para as novas observações. Ademais, essa regressão indica a direção, o tamanho e a significância estatística da relação entre um respectivo preditor e a variável dependente. Cabe ressaltar que R²=99,92%, isto é, o modelo indica que os 4 preditores puros e suas 5 interações de 2ª ordem representam 99,92% da força de conformação Fz_pico P7 nessa investigação.

Na FIGURA 169 apresenta-se o resumo do gráfico das interações dos fatores significativos, corroborando com as análises exploradas até aqui e, principalmente, indicando que o parâmetro de maior impacto na força de conformação é a espessura da chapa “t”,

aspecto de projeto e, na sequência, o incremento em z, “ Δz ”, tem o segundo maior impacto, variável que pode ser ajustada na máquina e que torna-se preponderante nessa investigação, ou seja, no aprimoramento da tecnologia de estampagem progressiva (ISF).

FIGURA 169 - GRÁFICO DE RESÍDUOS *VERSUS* O VALOR AJUSTADO R4, FZ_PICO, P7.



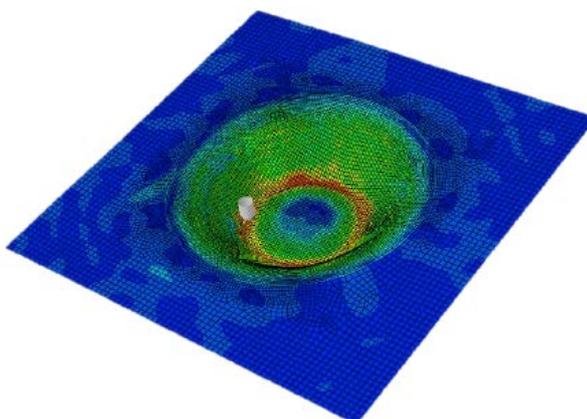
FONTE: O autor.

6.9 INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL *VERSUS* SIMULAÇÃO NUMÉRICA

A simulação computacional do processo experimental foi realizada por intermédio do software CAE Abaqus® 6.12.11. O Abaqus® é um programa para resolver problemas em ciência e engenharia baseado no método dos elementos finitos. O programa pode otimizar diversos tipos de condições matemáticas, desde a análise linear simples, até simulações complexas não lineares. O software apresenta uma extensa biblioteca de elementos finitos que permite a modelagem de praticamente qualquer geometria, bem como uma extensa lista de modelos que simulam o comportamento da grande maioria dos materiais, permitindo, dessa maneira, a sua aplicabilidade em diferentes áreas da engenharia, destacando-se o setor automotivo, o de bens de consumo e a indústria de eletrônicos, todos usuários da tecnologia de estampagem incremental de chapas (ISF). Utiliza-se, também, para o adequado dimensionamento de matrizes, como no desenvolvimento de produtos finais. Nesse norte, a

FIGURA 170 traz a imagem da peça produzida nessa investigação pelo processo de estampagem incremental por ponto único em centros de usinagem CNC.

FIGURA 170 - ESTAMPAGEM INCREMENTAL SIMULADA POR INTERMÉDIO DO AMBIENTE ABAQUS®.



FONTE: Filho (2016).

A partir dos resultados experimentais extraídos do experimento fatorial completo 2^5 , isto é, dos dados de força Fz_pico no passe 7 referentes aos fatores significativos, pode se verificar se o modelo computacional consegue prever as cargas geradas e, adicionalmente, quando de mudanças dos parâmetros de processo, a respectiva análise de confiabilidade dos valores obtidos na simulação numérica. Enfim, um apontamento inicial para contribuir no desenvolvimento da tecnologia e aperfeiçoar o método de tomada de decisão.

Na TABELA 42 abaixo, tem-se os parâmetros determinados como sendo os valores iniciais para a simulação numérica em curso, pois optou-se pela avaliação dos resultados da força Fz_pico justamente nas extremidades do delineamento sob investigação. Essa decisão favorece, sobremaneira, a análise do comportamento dos fatores significativos observados no item 6.1.

TABELA 42- PARÂMETROS ASSUMIDOS PARA A SIMULAÇÃO NUMÉRICA EM CURSO.

Diâmetro do Punção d_t (mm)	Ângulo de Parede α (°)	Espessura da Chapa t (mm)	Avanço do Incremento Δz (mm)
5	40	0,43	0,40
8	60	0,80	0,80

FONTE: Filho (2016).

Esses diferentes fatores e parâmetros de processo correspondem, por ora, a 16 ensaios combinados, que foram conduzidos experimentalmente, conforme TABELA 43, e podem então ser analisados e comparados com os dados obtidos pela análise de regressão DOE e, adicionalmente, pelos valores obtidos da modelagem por elementos finitos via Abaqus®. Os dados foram referentes ao avanço ajustado em 200mm/min, apesar do fator “f” não ser significativo.

TABELA 43 - MODELAGEM DOS EXPERIMENTOS PARA A DEVIDA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.

Teste seq#	Diâmetro do Punção d_t (mm)	Ângulo de Parede α (°)	Espessura da Chapa t (mm)	Avanço do Incremento Δz (mm)	Fz_pico experimental	Fz_pico DOE	Fz_pico simulação
17	5	40	0,43	0,40	292,00	294,27	
89*	5	40	0,43	0,80	498,04	498,04	
21	5	40	0,80	0,40	821,28	825,84	
61**	5	40	0,80	0,80	1244,14	1256,84	
19	5	60	0,43	0,40	330,08	331,38	
27	5	60	0,43	0,80	593,76	587,57	
23	5	60	0,80	0,40	952,14	939,77	
31	5	60	0,80	0,80	1435,54	1425,77	
18	8	40	0,43	0,40	345,70	347,01	
26	8	40	0,43	0,80	631,84	632,16	
22	8	40	0,80	0,40	933,60	920,90	
30	8	40	0,80	0,80	1466,80	1480,47	
20	8	60	0,43	0,40	369,14	396,81	
28	8	60	0,43	0,80	777,34	742,19	
24	8	60	0,80	0,40	1037,10	1018,23	
32	8	60	0,80	0,80	1682,62	1688,48	

* utilizou-se o dado referente a 3ª repetição, uma vez que os testes 25 e 57 foram excluídos

**utilizou-se o dado referente a 2ª repetição, uma vez que o teste 29 falhou.

FONTE: O autor.

Gize-se que, os dados extraídos dos ensaios experimentais poderão ser analisados e comparados com os resultados da simulação computacional em desenvolvimento e, dessa forma, aproximar o modelo ainda mais do fenômeno real e, nesse sentido, viabilizar, consequentemente, a utilização do ambiente Abaqus® como plataforma para otimização dos parâmetros de processo.

6.10 ENSAIO COMPLEMENTAR PARA PROFUNDIDADE MÁXIMA $H_{MÁX}$

No intuito de complementar as análises estatísticas conduzidas em relação aos esforços de conformação Fz_pico no passe 7, decidiu-se, pois, pela avaliação do grau de estampabilidade produzido pela variação dos fatores principais “ Δz ” e o diâmetro do punção “ d_t ”, o que significa a realização de um experimento fatorial completo do tipo 2^2 ,

TABELA 44, onde, nesse caso, os fatores principais são apenas “ Δz ” e “ d_t ”, mantendo-se as outras 3 variáveis contantes em:

- Ângulo de parede $\alpha=40^\circ$
- Espessura da chapa $t=0,43\text{mm}$
- Avanço $f=200\text{mm/min}$

TABELA 44- NÍVEIS DOS FATORES “ ΔZ ” E “ D_t ” PARA O EXPERIMENTO COMPLEMENTAR DE “ $H_{MÁX}$ ”.

Fatores	Níveis		
	-1	0	+1
A. Diâmetro d_t [mm]	5	6	8
B. Incremento Δz [mm]	0,40	0,60	0,80

FONTE: O autor.

Repise-se que o respectivo arranjo experimental pretende avaliar a profundidade máxima de deformação “ $h_{máx}$ ” até o rompimento da chapa, privilegiando, entretanto, a cautela e a integridade dos elementos, motivo pelo qual ajustou-se os fatores críticos, quais sejam: espessura da chapa e ângulo da parede, ambos no menor nível da combinação principal, posto que, com esta associação, as cargas de conformação não superam os limites de resistência da máquina-ferramenta CNC, do sistema de fixação prensa-chapa, nem da própria ferramenta. Desse modo, na TABELA 45, tem-se a configuração das variáveis, bem como a sequência dos testes e os resultados obtidos nesse ensaio complementar. Naturalmente, todos os materiais e métodos são os mesmos descritos no capítulo 3.

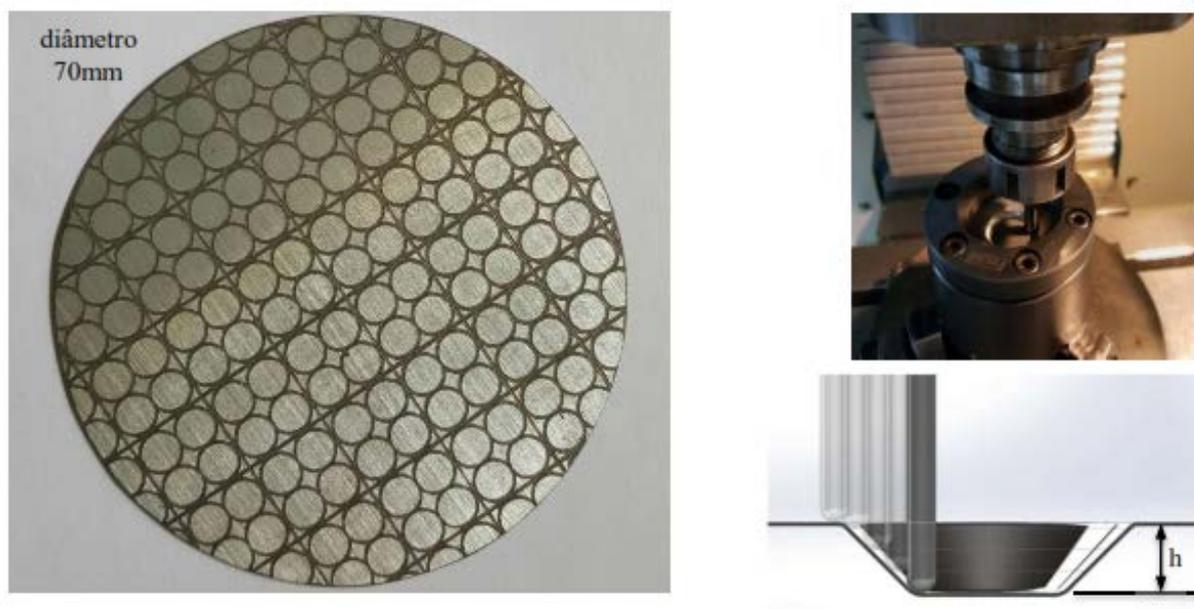
TABELA 45 - ARRANJO EXPERIMENTAL DOS 9 TRATAMENTOS E 3 REPETIÇÕES DO ENSAIO COMPLEMENTAR PARA $H_{MÁX}$.

Fator		Tratamentos	Repetições (n)		
A	B		I - h(mm)	II - h(mm)	III - h(mm)
-	-	A 5; B 0,40	16,42	16,63	16,54
+	-	A 8; B 0,40	17,31	17,84	17,85
-	+	A 5; B 0,80	8,70	7,83	7,54
+	+	A 8; B 0,80	8,67	8,50	8,70
0	0	CENTRAL	12,45		
0	0	CENTRAL	12,25		
0	0	CENTRAL	11,30		
0	0	CENTRAL	11,24		
0	0	CENTRAL	12,65		

FONTE: O autor.

Neste cenário, para a referida análise das deformações sofridas pelo material e a posterior obtenção das curvas limites de conformação, foi gravada uma malha de círculos tangentes na superfície externa da chapa, inicialmente, com diâmetro de 5mm, por meio do procedimento de foto-corrosão no lado da peça que não sofre contato direto com a ferramenta, FIGURA 171. Após a deformação do corpo de prova foi possível medir os valores do eixo maior e do eixo menor de cada elipse e, sobretudo, calcular as deformações convencionais maior e menor, e_1 e e_2 , respectivamente. Com estes valores, podem ser calculadas as deformações verdadeiras ε_1 e ε_2 e, assim sendo, o levantamento preliminar do diagrama limite de conformação do material, a DLC. Ressalta-se que a construção das curvas DLC's está em andamento por intermédio de outro trabalho em estampagem incremental de chapas (ISF), de maneira que, nesse momento, o objetivo é apenas averiguar qual condição proporciona o maior grau de estampabilidade em termos de “ $h_{máx}$ ”.

FIGURA 171 - MALHA DE CÍRCULOS GRAVADA POR FOTO-CORROSÃO E ISF EM PROGRESSO “H”; T=0,43MM.



FONTE: O autor.

Na FIGURA 172 encontram-se os resultados obtidos na primeira rodada das observações. Na coluna da esquerda, verificam-se as fotografias em frente e verso do corpo de prova testado sob as condições de $d_t=5\text{mm}$ e $\Delta z=0,40\text{mm}$, onde, registra-se, não foram detectados rompimentos até a profundidade de 42 vezes o incremento em z, “ Δz ”. Entretanto, na coluna da direita, encontram-se as fotografias em frente e verso do corpo de prova testado

sob as condições de $d_t=5\text{mm}$ e $\Delta z=0,80\text{mm}$, onde, destaca-se, ocorreu o rompimento da chapa na profundidade de 11 vezes o incremento em z, “ Δz ”.

FIGURA 172 - CORPOS DE PROVA DEFORMADOS COM $D_T=5\text{MM}$ E; (A) $\Delta Z=0,4\text{MM}$; (B) $\Delta Z=0,8\text{MM}$.



(a) $\# \Delta z=0,40\text{mm}$
sem rompimento

(b) $\# \Delta z=0,80\text{mm}$
com rompimento

FONTE: O autor.

Percebe-se assim, claramente, que se mantendo o diâmetro do punção $d_t=5\text{mm}$ e variando apenas o incremento em z, “ Δz ”, ocorre uma significativa alteração na profundidade máxima “ $h_{\text{máx}}$ ” atingida pelo processo de estampagem progressiva (ISF), evidentemente, quando todos os demais parâmetros permanecem constantes. Isto é, no caso do incremento ajustado para $\Delta z=0,80\text{mm}$, o corpo de prova rompeu na profundidade de $11 \times \Delta z$ para o corpo de prova na repetição $n=1$ e, nas repetições $n=2$ e $n=3$, a ruptura ocorreu ainda mais precocemente, quando a profundidade “ h ” atingiu $10 \times \Delta z$. Contudo, na ocasião do incremento em z, “ Δz ”, posicionado no nível baixo (-1) – nesse caso em $\Delta z=0,40\text{mm}$ – não foi detectada nenhuma evidência de rompimento até a profundidade de $42 \times \Delta z$, ou seja, até a dimensão aproximada de $h=16,80\text{mm}$ não houve cisalhamento da chapa sob investigação. Contudo,

após o 40º passo, verifica-se uma intensa fragilização da parede da chapa. Do exposto, é possível constatar a nítida diferença de performance em termos de grau de estampabilidade para diferentes incrementos em z. Na TABELA 45, apresentam-se os respectivos valores de “ $h_{máx}$ ” nas 3 repetições para essa discussão.

FIGURA 173 - CORPOS DE PROVA DEFORMADOS COM $D_t=8\text{MM}$ E; (A) $\Delta Z=0,4\text{MM}$; (B) $\Delta Z=0,8\text{MM}$.



(a) # $\Delta z=0,40\text{mm}$
sem rompimento

(b) # $\Delta z=0,80\text{mm}$
com rompimento

FONTE: O autor.

No condição onde o diâmetro do punção está ajustado em $d_t=8\text{mm}$ e, similarmente, variando apenas o incremento em z, “ Δz ”, de 0,4mm para 0,8mm, tem-se resultados semelhantes aos descritos na avaliação anterior, posto que a profundidade máxima “ $h_{máx}$ ” atingida no ajustamento com menor incremento em z é, significativamente, maior que aquela atingida quando o incremento em z está no nível alto (+1), $\Delta z=0,8\text{mm}$, características estas ilustradas na FIGURA 173. Nesse contexto, verifica-se, ademais, que a profundidade máxima é ligeiramente superior quando $d_t=8\text{mm}$ e $\Delta z=0,4\text{mm}$, uma vez que foram 44 passes enquanto que, na avaliação anterior, $d_t=5\text{mm}$ e $\Delta z=0,4\text{mm}$, foram 42 passes. Todavia, não é possível assegurar que a utilização de diâmetros maiores proporciona, estatisticamente, um maior grau

de estampabilidade para a peça, sendo que esse aspecto deve ser investigado separadamente, haja vista ser muito importante e, em especial, ter forte dependência da área de projeto do produto.

FIGURA 174 - CORPOS DE PROVA DEFORMADOS COM $D_t=6\text{MM}$ E $\Delta Z=0,6\text{MM}$.



$\Delta z=0,60\text{mm}$

com rompimento

FONTE: O autor.

Por fim, no teste configurado com os fatores sob o ponto central, isto é, $d_t=6\text{mm}$ e $\Delta z=0,6\text{mm}$, verifica-se que a performance é melhor que aquela observada quando o incremento em z, “ Δz ”, está ajustado para $0,8\text{mm}$, seja no caso de $d_t=5\text{mm}$ ou $d_t=8\text{mm}$. Por outro lado, o resultado observado em termos de profundidade máxima atingida “ $h_{\text{máx}}$ ” é pior que aquele observado quando o incremento em z, “ Δz ”, está ajustado para $0,4\text{mm}$, também no caso de $d_t=5\text{mm}$ ou $d_t=8\text{mm}$. Logo, pode-se inferir – FIGURA 174 – que, de fato, o incremento em z, “ Δz ”, é fator preponderante no resultado da profundidade máxima possível de ser atingida e, quanto menor “ Δz ”, maior tende a ser a profundidade máxima obtida “ $h_{\text{máx}}$ ”.

A seguir, na EQUAÇÃO 15, apresenta-se o modelo de regressão para a profundidade nesse ensaio complementar, com nível de confiança em 99%. Contudo, cabe destacar que, não foi aprofundada a investigação nesse aspecto porquanto o objetivo principal aqui visado é, na

realidade, o de complementar a pesquisa em termos de Fz_{pico} . No APÊNDICE E, encontra-se todo o memorial de cálculo dessa função matemática.

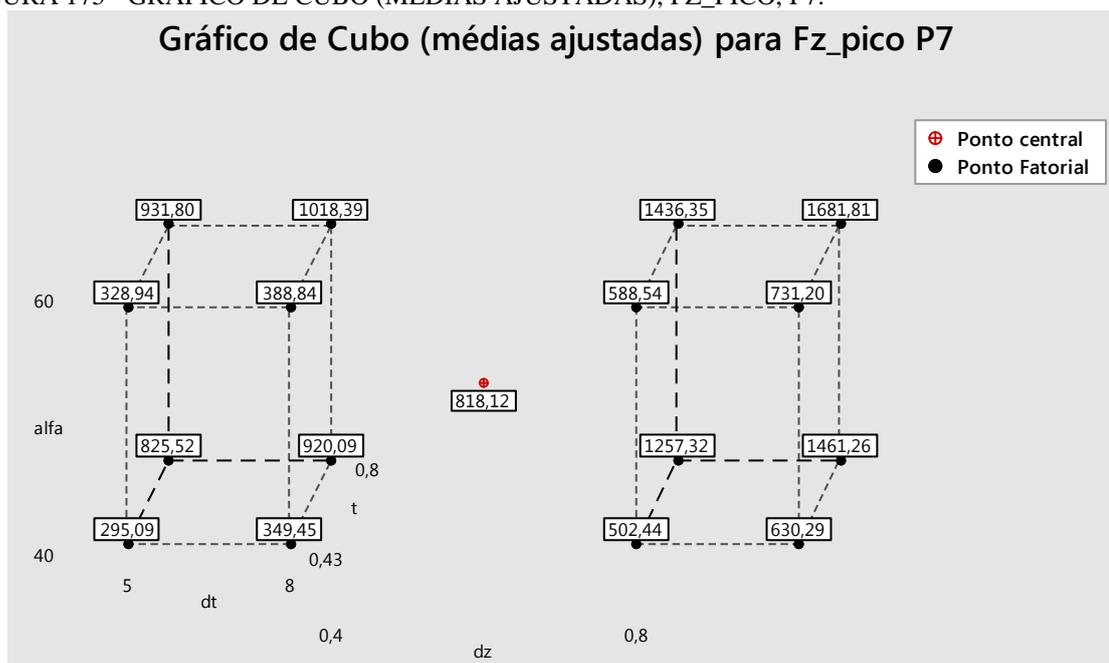
$$h_{\text{máx}} = 22,25 + 0,558 dt - 19,03 dz$$

(Equação 15)

6.11 RESUMO

De todo o exposto, denota-se que o presente capítulo explorou a análise DOE da investigação em desenvolvimento, apontando, sobremaneira, quais fatores principais são significativos e quais interações também podem ser consideradas significativas para um nível de confiança proposto de 99% para o delineamento experimental conduzido. No gráfico da FIGURA 175, destaca-se o método do cubo que busca traduzir as respostas obtidas por intermédio dos cálculos matemáticos numa única fotografia, permitindo, conseqüentemente, um resumo dos valores e do comportamento das variáveis independentes nos respectivos extremos em termos de efeitos sobre o fenômeno em estudo. Isto é, o parâmetro resposta Fz_{pico} no passe 7, chamado variável dependente, está exposto em *Newton* e, quanto menor, melhor para a performance do processo de estampagem progressiva (ISF). Desse modo, percebe-se que o maior impacto está associado à variação da espessura da chapa “t” (profundidade do cubo), seguido pela intensa influência do incremento “ Δz ” (cubo da esquerda e cubo da direita) enquanto o ângulo de parede “ α ” e o diâmetro do punção “ d_t ” apresentam leve influência sobre as forças Fz_{pico} no passe 7. Naturalmente, o avanço “f” não está representado, uma vez que não é significativo segundo a análise DOE percorrida. Por fim, o ponto central está equilibrado, evidenciando um modelo estatístico razoavelmente linear. Vale ressaltar que, entre os fatores principais analisados, tem-se, o incremento em z, “ Δz ”, como o parâmetro mais importante em termos de otimização do processo ISF.

FIGURA 175 - GRÁFICO DE CUBO (MÉDIAS AJUSTADAS), FZ_PICO, P7.



FONTE: O autor.

7 CONCLUSÃO

De toda a exposição contida nos capítulos anteriores, verifica-se que a presente investigação teórico-experimental dos esforços de conformação mecânica na estampagem incremental assimétrica por ponto único em centros de usinagem CNC proporcionou, fundamentalmente, importantes contribuições tecnológicas para o respectivo processo que está em franca ascensão nos laboratórios de pesquisa e, em especial, nas indústrias do setor de conformação de chapas (HUSMANN, 2016). Essa tendência, entretanto, já está consolidada, bem como assumiu papel de destaque na produção de pequenos lotes de produtos estampados e também na fabricação de protótipos em geral. Naturalmente, em ambos os casos, busca-se a utilização de máquinas-ferramentas CNC's já disponíveis no meio fabril e de sistemas para fixação da peça de baixa complexidade. As ferramentas aplicadas para a respectiva impressão da geometria almejada também podem ser obtidas a partir de materiais mais simples, como aço endurecido em vez de metal-duro, por exemplo. Dessa maneira, sobressai a relevância do trabalho e das informações técnicas oriundas do arranjo experimental fatorial completo 2^5 realizado, nesse contexto, com o claro propósito de permitir o desenvolvimento da engenharia e das inovações necessárias para a adequada viabilização do processo ISF a custo competitivo e, ademais, com significativo apelo ambiental e social, concomitantemente.

7.1 COMPORTAMENTO ESTATÍSTICO E LIMITES TECNOLÓGICOS DOS FATORES PRINCIPAIS

Desse modo, após a intensa análise do comportamento estatístico e tecnológico de cada um dos cinco fatores principais que compõem o delineamento experimental conduzido, apresenta-se, individualmente, as seguintes conclusões:

a) Em relação ao avanço do punção “f” (mm/min)

Esse parâmetro, nessa combinação, não é significativo em termos de esforços, isto é, pode-se maximizar a velocidade de avanço do punção para se produzir, no menor tempo possível, sem prejuízos em termos de sobrecarga nas forças presentes no processo. Todavia, ressalta-se que, apesar dessa recomendação, deve-se, por outro lado, atentar também para eventuais danos que possam surgir na peça em decorrência de prováveis vibrações induzidas ao corpo da ferramenta quando em elevadas velocidades de deslocamento. Nas análises estatísticas descritas no capítulo 5, item 5.11, percebe-se um certo grau de vibração,

especialmente quando o engajamento do punção na chapa também é pequeno. Assim, quando o comprimento em balanço do punção for grande e o incremento em z, “ Δz ” for pequeno, podem surgir vibrações no conjunto, danificando, eventualmente, a peça, ou até mesmo proporcionando a quebra da ferramenta, caso ela tenha diâmetro pequeno. Aliás, muito provavelmente tenha sido essa ocorrência que acometeu a ferramenta de diâmetro $d_t=4\text{mm}$ testada no ensaio preliminar, tópico 3.4. Observando-se, pois, esses limites tecnológicos ratifica-se, do ponto de vista estatístico, a indicação de se maximizar o avanço do punção “ f ” durante a realização da estampagem progressiva, ganhando em produtividade e, conseqüentemente, reduzindo o tempo de fabricação para os lotes projetados.

b) Em relação ao ângulo de parede “ α ” ($^\circ$)

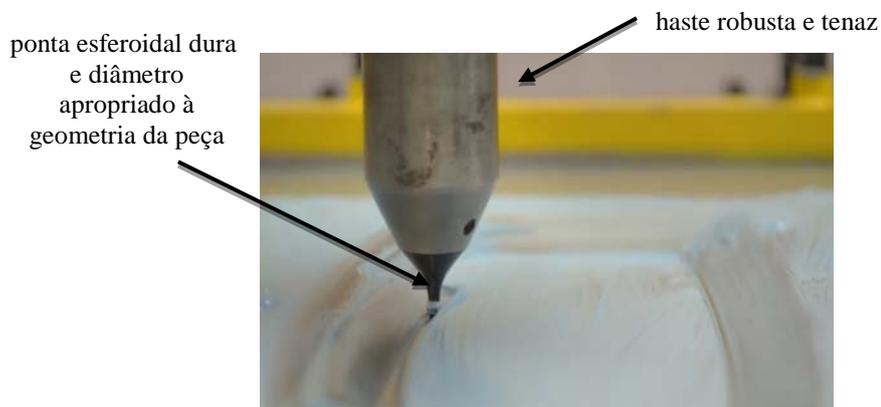
O ângulo de parede é um fator significativo nessa pesquisa e, notoriamente, uma variável definida em projeto. Implica em se observar na peça a ser produzida a região onde está presente a maior inclinação de parede a ser conformada e, posteriormente, avaliar a respectiva viabilidade de se produzir por estampagem incremental contínua (ISF) o produto projetado. Contudo, a influência do ângulo de parede nos esforços de conformação é pequena para uma mesma profundidade, pois, aparentemente, a complexidade da geometria a ser obtida não é aspecto preponderante em termos de sobrecarga nos esforços. Entretanto e, evidentemente, dependendo da profundidade em que tal complexidade deva ser impressa pode-se ultrapassar o respectivo limite do processo, seja da máquina, seja da ferramenta ou seja até mesmo da própria chapa fina, proporcionando risco ao processo e, inclusive, danos ao conjunto. Nesse sentido, o ângulo de parede, por si só, não apresenta elevada influência nas cargas geradas, porém, ele é bastante dependente da profundidade de deformação desejada para a peça existindo, assim, uma relação de compromisso entre o ângulo de parede “ α ” e a profundidade máxima projetada para o produto, “ $h_{\text{máx}}$ ” (mm). Isso significa que, caso seja possível deformar a chapa até a profundidade almejada, o ângulo de parede tende a não ser um parâmetro impeditivo ao processo do ponto de vista dos esforços gerados.

c) Em relação ao diâmetro do punção “ d_t ” (mm)

Assim como no item anterior, o diâmetro do punção também é um fator significativo ao processo em termos de esforços gerados no decorrer da estampagem incremental contínua (ISF). Nesse caso, também se verifica uma leve influência desse fator sobre a variável resposta Fz_{pico} P7, uma vez que, aumentando o diâmetro da ferramenta, proporciona-se pequeno incremento nos esforços de conformação. Portanto, deve-se utilizar o maior diâmetro

possível para o punção, visando melhorar sua rigidez, devendo-se, como critério que determina o diâmetro máximo que pode ser efetivamente atribuído ao punção, avaliar, preliminarmente, qual a região da peça a ser produzida que contém o menor raio de forma e, uma vez que este menor raio de forma será, de fato, a dimensão máxima do diâmetro do punção que deverá ser assumida para a respectiva impressão da geometria projetada. Isto é, para raios pequenos observados na geometria da peça, será necessário diâmetros pequenos para os respectivos punções e, por conseguinte, a ferramenta torna-se mais frágil e suscetível à quebra. Uma boa estratégia utilizada para aumentar a rigidez da ferramenta é fabricar sua haste em diâmetro maior do que a ponta que está efetivamente agindo na deformação da peça. Diante disso, indica-se a utilização de diâmetros menores à luz do tratamento estatístico desenvolvido, porém, sempre observando o menor raio da peça a ser obtida, bem como a eventual possibilidade de se aplicar ferramentas conjugadas, onde a haste tem dimensão maior que a ponta semiesférica – os chamados punções escalonados, acarretando, conseqüentemente, maior rigidez e resistência mecânica ao corpo. Na FIGURA 176, encontra-se um exemplo de punção conjugado.

FIGURA 176- FERRAMENTA CONJUGADA, HASTE E PONTA SEMIESFÉRICA.



FONTE: O autor.

d) Em relação ao incremento em z “ Δz ” (mm)

O incremento em z torna-se, essencialmente, o fator significativo mais importante para esse experimento fatorial pois, assim como o avanço “f”, o passe em z do punção é totalmente independente do projeto do produto, ou seja, pode-se ajustar o valor de “ Δz ” na melhor condição possível no intuito de minimizar as cargas de conformação existentes e, dessa maneira, viabilizar que o processo seja realizado na máquina-ferramenta CNC disponível, com o diâmetro de punção necessário e ângulo de parede também definido por projeto. Indica-se, pois, que o parâmetro “ Δz ” seja o menor possível dentro das faixas de trabalho

adequadas ao conjunto geometria do produto/material e espessura da chapa e, outrossim, torna-se também a variável preponderante para a adequada tomada de decisão em relação à viabilidade do processo ou, por outro lado, será por intermédio da respectiva otimização desse fator que uma determinada configuração máquina e punção poderá atender, ou não, a demanda de fabricação, uma vez que a espessura da chapa e a geometria do produto estão pré-definidas. Adicionalmente, registra-se nesse instante o surgimento de uma ótima oportunidade para que haja uma interação entre as áreas de engenharia de manufatura e de desenvolvimento de produto, com o objetivo de aprimorar o processo de concepção da peça por intermédio dessa engenharia simultânea.

e) Em relação à espessura da chapa “ t ” (mm)

Por fim, a espessura da chapa é absolutamente significativa nesse delineamento experimental, e totalmente dependente da área de projeto do produto, ou seja, pode-se almejar influenciar na definição do material, na espessura da chapa ou até mesmo na sofisticação da geometria proposta para a respectiva peça como, por exemplo, sugerindo aumentar raios e reduzir profundidades com o propósito de se minimizar as cargas presentes no processo de estampagem. Todavia, como esse parâmetro tende a ser indicado diretamente pela área de projeto verifica-se, sobremaneira, a importância da disseminação dessa tecnologia para esses setores, a fim de permitir que o referido processo seja considerado como parte das soluções inovadoras e inteligentes que podem ser utilizadas pela manufatura em geral no processo de obtenção de peças estampadas em geral.

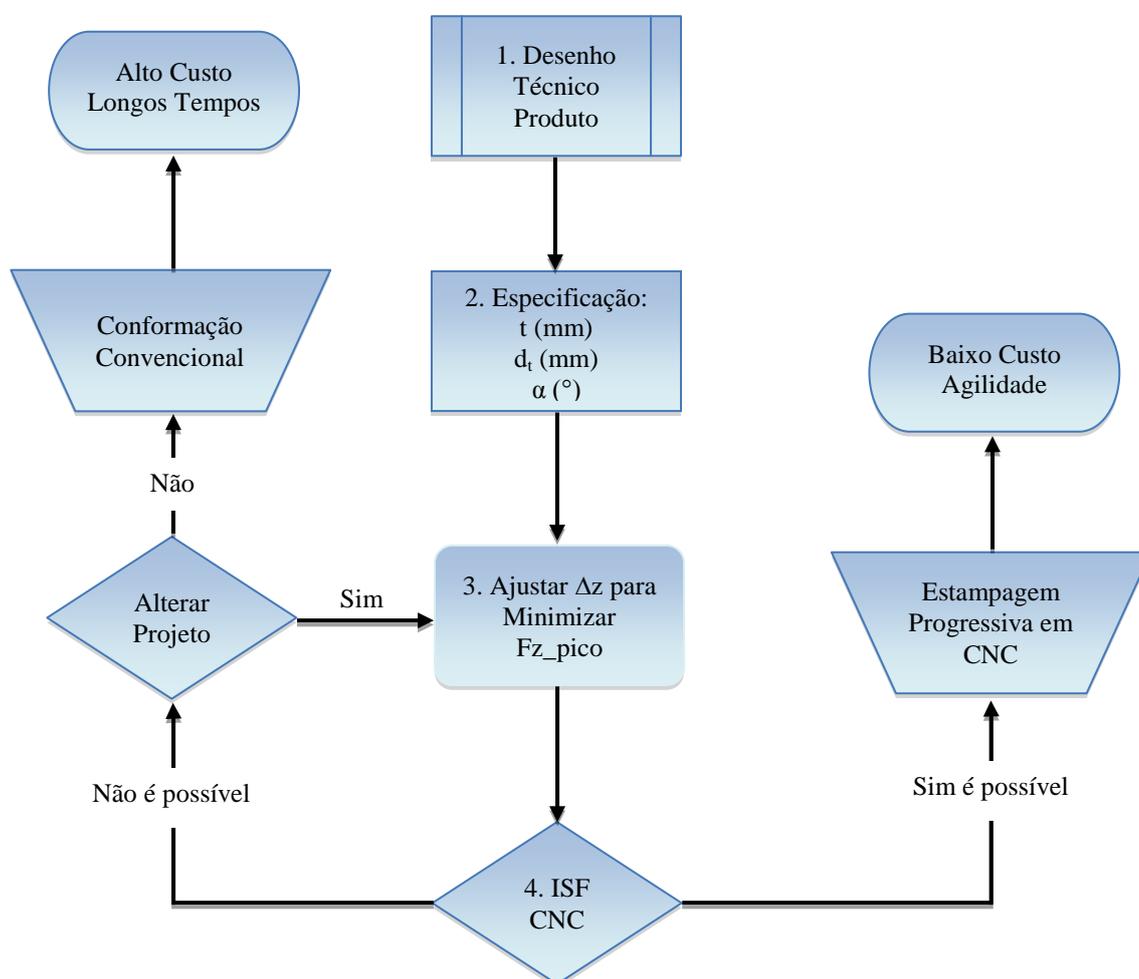
Indica-se, portanto, em relação à espessura da chapa “ t ”, buscar uma maior interação com o setor de projetos para que seja possível a otimização da geometria almejada com vista à estampagem progressiva (ISF).

Na FIGURA 177 encontra-se a sugestão de fluxograma para a respectiva tomada de decisão quando da aplicação ou não da tecnologia de estampagem incremental contínua (ISF).

Conforme observado no fluxograma, com o desenho técnico do produto a ser produzido em mãos (1) verifica-se, primeiramente, as condições de contorno para sua obtenção, ou seja, as respectivas informações provenientes de projeto como: espessura da chapa “ t ”, máximo diâmetro do punção “ d_t ” e ângulo de parede “ α ” (2). Na sequência, avaliando também a geometria de conformação e, nesse sentido, o ponto mais crítico que combina profundidade/raio de forma/ângulo de parede, pode-se, por tentativa, ajustar o incremento em z , “ Δz ”, para alcançar a faixa de valores de esforços aceitável para o respectivo conjunto centro de usinagem CNC/sistema de fixação da peça/ferramenta/chapa e,

dessa maneira, avaliar se o respectivo conjunto suporta o processo delineado sem qualquer dano colateral (4). Assim é que, na etapa (4), testa-se a viabilidade da aplicação do processo de estampagem incremental de chapas em centros de usinagem CNC e, caso seja afirmativo o ajustamento, prossegue-se, definitivamente, para a fabricação do produto em tempo menor e custo mais baixos. Caso contrário, testa-se uma alternativa de alteração no projeto do produto, interagindo com a área de pesquisa e desenvolvimento e, sendo viável em termos técnicos e estratégicos para a empresa, pode-se, novamente, seguir o fluxo que conduz à aplicação da tecnologia ISF, conquistando ganhos financeiros e não-financeiros.

FIGURA 177 - FLUXOGRAMA PARA TOMADA DE DECISÃO EM ISF COM CNC.



FONTE: O autor.

Por outro lado, caso não seja possível a respectiva utilização da estampagem progressiva (ISF), naturalmente, o processo utilizado para a devida fabricação da chapa tende a ser a conformação convencional, que exige mais tempo e gera um custo mais elevado.

7.2 CARGA DE CONFORMAÇÃO

Isto posto, e respondendo a questão problema formulada no capítulo 1 desse documento, a principal contribuição dessa pesquisa é, essencialmente, o modelo matemático inovador que expressa a maior carga presente no processo de estampagem incremental da chapa (*Incremental Sheet Forming*), denominada Fz_pico presente na maior profundidade de deformação da peça em produção. Desse modo, a equação obtida é função, evidentemente, dos fatores individuais e das interações de 2ª ordem significativos ao fenômeno em estudo e, adicionalmente, está associada ao erro decorrente dos ruídos internos e externos. Nesse sentido, abaixo se apresenta a expressão final da análise de regressão com o respectivo coeficiente de confiabilidade posicionado em 99%, $\alpha=0,01$, onde o coeficiente de determinação ajustado equivalente $R^2=99,89\%$.

$$Fz_pico\ P7 = -1050 + 117\ dt + 20,1\ \alpha + 2105\ t + 583\ dz - 137\ dt*t \\ - 1\ dt*dz - 38,9\ \alpha*t - 22,1\ \alpha*dz - 398\ t*dz$$

(Equação 16)

O resultado da regressão linear múltipla indica que os 9 preditores significativos são responsáveis por 99,89% da variância na força máxima de conformação Fz_pico , no passe 7 e, especificamente para os fatores puros, pode-se concluir:

- ✓ Para cada aumento de 1mm no diâmetro do punção “ d_i ”, espera-se que a força Fz_pico (P7) aumente em 117 unidades;
- ✓ Para cada aumento de 1° no ângulo de inclinação da parede “ α ”, espera-se que a força Fz_pico (P7) aumente em 20,1 unidades;
- ✓ Para cada aumento de 0,1mm na espessura da chapa “ t ”, espera-se que a força Fz_pico (P7) aumente em 210,5 unidades;
- ✓ Para cada aumento de 0,1mm no incremento em z , “ Δz ”, espera-se que a força Fz_pico (P7) aumente em 58,3 unidades.

Adicionalmente, para as interações de 2ª ordem, pode-se inferir:

- ✓ Para cada aumento de 1 unidade na relação “ d_i ” e “ t ”, espera-se que a força Fz_pico (P7) decresça em 137 unidades;

- ✓ Para cada aumento de 1 unidade na relação “ d_t ” e “ Δz ”, espera-se que a força Fz_pico (P7) decresça em 1 unidade;
- ✓ Para cada aumento de 1 unidade na relação “ α ” e “ t ”, espera-se que a força Fz_pico (P7) decresça em 38,9 unidades;
- ✓ Para cada aumento de 1 unidade na relação “ α ” e “ Δz ”, espera-se que a força Fz_pico (P7) decresça em 22,1 unidades;
- ✓ Para cada aumento de 1 unidade na relação “ t ” e “ Δz ”, espera-se que a força Fz_pico (P7) decresça em 398 unidades.

Portanto, constata-se nas especificações anteriores que o parâmetro espessura de parede “ t ” é, de fato, o fator com maior influência sobre o esforço final Fz_pico , impondo, estatisticamente, algo em torno de 210,5 unidades de aumento na força Fz_pico para cada 0,1mm de incremento na espessura da chapa “ t ”, o que pode ser considerado bastante significativo ao processo em termos de segurança da máquina, do sistema de fixação e, em especial, da própria ferramenta. Entretanto, conforme abordado preliminarmente, essa variável é considerada definição de projeto e, no limite, pode-se interagir para seu ajustamento mas, por ora, assume-se como especificação de projeto sem possibilidade de modificação, apesar da forte influência da mesma sobre a magnitude da carga.

Observa-se que o diâmetro do punção “ d_t ” tem influência sobre a variável resposta Fz_pico impondo, estatisticamente, algo em torno de 117 unidades de aumento na força Fz_pico para cada 1mm de incremento no diâmetro do punção “ d_t ”. Todavia, esse fator também é considerado parâmetro de processo, uma vez que o menor raio de conformação presente na geometria do produto final estabelece, por conseguinte, o maior raio possível para o punção que deve ser utilizado para deformar a respectiva região delineada. Destaca-se, contudo, que quanto maior o raio do punção, melhor tende a ser resistência mecânica da ferramenta. Assim, se por um lado almeja-se diâmetros maiores para que seja possível absorver cargas maiores, por outro, diâmetros maiores limitam o grau de sofisticação da geometria da peça a ser obtida.

Enquanto os dois parágrafos anteriores levaram em consideração o efeito apenas do fator puro, deve-se analisar, concomitantemente, os efeitos decorrentes também das interações significativas de 2ª ordem. Nesse aspecto, resta nítido que a espessura da chapa “ t ” tem mais três contribuições e, coincidentemente, todas as três contribuições são no sentido contrário ao observado no efeito puro. Nesse caso, as contribuições reduzem o valor da variável resposta

Fz_pico, contudo, em proporções claramente menores. Sendo a redução na grandeza da força Fz_pico esperada para cada unidade de incremento na espessura da chapa “t”, em menos; 137 unidades, 38,9 unidades e 398 unidades em decorrência das respectivas interações significativas, “t” e “d_t”, “t” e “α” e, por fim, “t” e “Δz”. Essas 3 contribuições somadas no sentido negativo da força reduzem o impacto do crescimento da força Fz_pico quando levado em consideração apenas o fator puro “t”. Isso significa que, com certeza, o incremento na força Fz_pico será grande, na medida em a espessura da chapa “t” aumentar cada décimo de milímetro. Desse modo, o incremento exato que a força Fz_pico terá a cada 0,1mm de incremento na espessura da chapa “t” pode ser calculado pelo modelo matemático expresso na EQUAÇÃO 16, mantendo todos os demais fatores constantes. Porém, esse dado deve ser observado com razoável ressalva pois, a própria composição do material da chapa pode influenciar esse comportamento elástico, bem como, nessa pesquisa, recomenda-se aprofundar as análises estatísticas em cada fator no intuito de elevar a confiabilidade das inferências produzidas, ou seja, sugere-se, por exemplo, realizar um novo experimento fatorial direcionado para as variáveis mais sensíveis.

Assim sendo, tanto o parâmetro espessura da chapa “t” quanto o diâmetro do punção “dt” são fatores importantes, contudo, determinados basicamente pela área de projetos. Outrossim, observando os apontamentos em relação ao ângulo de parede “α”, verifica-se que ele tende a ter impacto limitado nas forças, de maneira que o incremento no valor do ângulo não sugere significativo impacto na força Fz_pico, podendo-se concluir que geometrias mais ou menos complexas não tendem a ser fatores críticos em termos de cargas de conformação, ou seja, mesmo para ângulos de paredes agressivos os esforços gerados devem permanecer em patamares aceitáveis ao processo e ao conjunto máquina/sistema de fixação/punção.

De todo o exposto, e a partir do experimento prático e das análises individuais de cada fator conclui-se, claramente, que **o principal parâmetro a ser levado em consideração** para a assertiva tomada de decisão e, por conseguinte, **o correto ajustamento do processo ISF** ao conjunto centro de usinagem CNC/punção/sistema de fixação da peça é **o incremento em z, “Δz”**. Nesse aspecto, a modelagem matemática obtida deve ser otimizada em relação à variável independente “Δz”, sobretudo no intuito de minimizar a força Fz_pico no passe mais profundo verificado na geometria do produto. Nesse contexto, a EQUAÇÃO 17 abaixo traz outra contribuição importante que, essencialmente, corrobora com a otimização do processo ISF, proporcionando a inferência de que, tanto menor for o incremento em z, “Δz”, menor o esforço máximo observado no processo Fz_pico e, sobretudo, tanto maior será a profundidade

máxima “ $h_{m\acute{a}x}$ ” possível der ser atingida sem comprometer a integridade do conjunto e da própria peça a ser conformada.

$$h_{m\acute{a}x} = 22,25 + 0,558 dt - 19,03 dz$$

(Equação 17)

Percebe-se, ademais, pelos esforços analisados, que o processo de estampagem progressiva (ISF) tem grande aplicabilidade em peças rasas, consistente na obtenção de perfis não muito salientes e até mesmo na produção de geometrias complexas, porém, e com muita atenção, deve-se levar em conta a permanente ressalva da profundidade máxima possível de ser atingida no respectivo processo sem que sejam excedidos os limites de segurança do sistema de fixação, de resistência da ferramenta e, em especial, de integridade do fuso da máquina CNC que suportará a maior parte dos esforços, sempre atendendo, evidentemente, os requisitos de projeto tanto em termos de geometria do produto, quanto em termos de resistência da parede da peça que será exigida mecanicamente.

Conclui-se, todavia, que é viável atingir grandes profundidades de deformação com baixos patamares de esforços ajustando o incremento em z, “ Δz ”, para o menor valor possível ao processo delineado em questão, de modo que a otimização e conseqüente viabilização de produção de peças por estampagem incremental de chapas (ISF) está fortemente condicionada à correta determinação do passe no eixo z, FIGURA 178. Diante disso, percebe-se a grande oportunidade de desenvolvimento da tecnologia ISF fazendo uso de ambientes consagrados como CAE/CAD/CAM apoiando a utilização de centros de usinagem CNC. Novamente, softwares e conhecimento de engenharia amplamente dominados pela área fabril de pequenas, médias e grandes empresas (DAVARPANA *et al.*, 2015).

FIGURA 178 - DIFERENÇA NA PERFORMANCE DO PROCESSO ISF EM TERMOS DO PASSE NO EIXO Z, “ ΔZ ”.



(a)

$$d_t=5\text{mm} ; \Delta z=0,40\text{mm}$$

$$h_{\text{máx}}=16,80\text{mm}$$



(b)

$$d_t=5\text{mm} ; \Delta z=0,80\text{mm}$$

$$h_{\text{máx}}=8,80\text{mm}$$

FONTE: O autor.

Assim, constata-se pois, que a utilização de sistemas CAE/CAD/CAM como meio para apoiar o desenvolvimento das estratégias de movimentação do punção é fundamental e, nesse contexto, alguns trabalhos apresentam resultados satisfatórios quando da aplicação desses ambientes computacionais que, originalmente, foram desenvolvidos para a área de usinagem e, nesse momento, estão sendo utilizados no processo de estampagem incremental de chapas (ISF) com plena performance (MEIER, 2012). Verifica-se, também, a aplicação de softwares CAE/CAD/CAM como ambiente de apoio para a correta fabricação de próteses humanas por intermédio da tecnologia de estampagem progressiva (CASTELAN, 2014), deixando claro que a tecnologia tende a assumir papel de relevância na fabricação de pequenos lotes e, em especial, na conformação de geometrias especiais, desde próteses humanas até perfis específicos que podem estampar a porta de um eletrodoméstico ou, até mesmo, o capô de um carro. Tem-se, assim, nitidamente, uma tendência de uso de máquinas CNC's na produção de peças conformadas por estampagem progressiva em vez de equipamentos especiais e caros.

Em razão disso, novas máquinas CNC's estão surgindo no mercado, motivo pelo qual não devem mais ser chamadas apenas de centros de usinagem CNC pois, além da remoção de material clássica por intermédio de fresamento, furação ou rosqueamento, referidas máquinas estão sendo utilizadas também na impressão de geometrias de forma em chapas finas. Isto é, essas máquinas-ferramentas tendem a absorver significativa diversidade de processos de fabricação como, por exemplo, os supracitados, e o próprio ISF, percebendo-se, assim, que a evolução dos equipamentos em termos de multifuncionalidade é crescente, necessária e

alinhada com os anseios de flexibilização e sustentabilidade impostos pela realidade de mercado.

Por fim, as grandes empresas automobilísticas, indústrias da linha branca e fabricantes de protótipos em geral estão sendo impactados por essa nova possibilidade de obtenção de chapas estampadas a baixo custo e em prazos curtos. Isso significa que está em pleno curso o fenômeno da engenharia colaborativa, a qual está claramente influenciando as áreas de pesquisa e desenvolvimento de produto, uma vez que ela permite encurtar significativamente o tempo de projeto e manufatura do produto, bem como customizar certas características e, nesse sentido, atingir um público maior a preços competitivos. Assegura-se, por conseguinte, forte apelo sustentável à empresa e maior versatilidade ao parque fabril, proporcionando significativa vantagem competitiva num cenário cada vez mais dinâmico, agressivo e desafiador. Concluindo, contribui-se fortemente com a perenidade desejada pela organização.

7.3 SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS

Após a realização da pesquisa e a consequente discussão dos resultados destacam-se, pelo menos, sete sugestões para próximos trabalhos visando avançar no desenvolvimento da tecnologia de estampagem incremental de metais (ISF).

A primeira indicação é a de aprofundar a própria análise do delineamento experimental DOE a partir dos dados obtidos nessa investigação, ou seja, procurar relacionar os valores de força Fz_{pico} desde o 3º passe até o 7º passe registrado e, dessa maneira, encontrar uma equação matemática que possa revelar um novo modelo de regressão válido ao longo de toda a profundidade em estampagem e, assim sendo, extrapolar o modelo que representa o fenômeno buscando determinar os limites de profundidade possíveis de serem atingidos sem acarretar danos ao conjunto e, em especial, à peça/produto.

Sugere-se, também, testar os limites do fator avanço “f” no processo de estampagem progressiva para outras combinações: material da peça, espessura da chapa e geometria final, pesquisando eventuais restrições para a velocidade de avanço do punção ou, se de fato, o mesmo pode ser sempre o máximo possível sem, naturalmente, exceder a resistência da ferramenta.

Outro aspecto importante a ser aprofundado é o desenvolvimento da simulação numérica como tecnologia para suporte nas determinações preliminares dos esforços presentes no processo e, sobretudo, na avaliação da viabilidade de obtenção dos produtos sem o comprometimento da qualidade da peça, da integridade da máquina, do sistema prensa-

chapa e da ferramenta. A plena utilização de ambientes CAE/CAD/CAM no uso dessa tecnologia de conformação.

A qualidade final da peça produzida deve ser investigada à luz dos parâmetros de processo como diâmetro do punção “ d_i ” e incremento em z, “ Δz ”, ou seja, averiguar a rugosidade impressa na chapa a partir desses fatores e, nesse contexto, buscar otimizar a qualidade superficial da área conformada por intermédio da combinação dos melhores valores para os respectivos fatores (MUGENDIRAN, 2014). E, nesse sentido, o estudo da influência de lubrificantes no resultado do processo também é essencial, seja para minimizar as cargas uma vez que o coeficiente de atrito entre as superfícies é reduzido, seja para favorecer o próprio deslizamento e estiramento da peça. Nesse âmbito devem também ser investigados os fenômenos de estiramento e embutimento que ocorrem no decorrer da estampagem do produto, ou seja, a adequada construção das curvas limites de conformação, CLC’s.

Aconselha-se, ainda, a investigar a integração de sistemas de fixação especiais à mesa da máquina buscando proporcionar a obtenção de geometrias mais complexas, como, por exemplo, utilizando uma matriz como base de suporte para o escoamento da chapa que está deformada e, por conseguinte, as novas variáveis de processo que podem favorecer ou não a aplicação da estampagem incremental contínua como processo alternativo ao método tradicional que utiliza grandes prensas e matrizes caras.

E, como nessa pesquisa foi escolhido o processo de estampagem incremental assimétrico por ponto único como modo de conformação, sugere-se, em especial, a busca por novas informações quando da utilização de gabaritos nos processos ou, no limite, a possibilidade do desenvolvimento de sistemas de fixação inteligentes que possam permitir uma maior cobertura do perfil da peça em termos de sustentação e fixação da área em conformação.

Por fim, sugere-se aprimorar a correlação do comportamento dos esforços com a profundidade estampada, isto é, a partir do conhecimento que o incremento vertical Δz é o parâmetro com maior influência sobre a performance do processo em termos de estampabilidade, pode-se, assim sendo, avançar nessa linha de pesquisa para se otimizar a tecnologia ISF e, por conseguinte, viabilizar tecnicamente e financeiramente a obtenção de produtos sofisticados a baixo custo e em centros de usinagem CNC, agregando à competitividade das empresas em geral.

REFERÊNCIAS

- ALLWOOD, J. M; SHOULER D. R. **Generalised Forming Limit Diagrams Showing Increased Forming Limits with Non-Planar Stress States**. *Int. J. Plast.*, vol. 25, no. 7, pp. 1207–1230, Jul. 2009.
- ALTAN, T., TEKKAYA, A. E. **Sheet Metal Forming: Fundamentals**. Ohio - USA: ASM international, 2012.
- ALVES, J. L. C. M., **Simulação Numérica do Processo de Estampagem de Chapas Metálicas**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade do Minho. Guimarães, Portugal, pp. 368. 2003.
- AMBROGIO, G., FILICE, L.; GAGLIARDI, F. **Formability of Lightweight Alloys by Hot Incremental Sheet Forming**. *Mater. Des.*, vol. 34, pp. 501–508, Feb. 2012.
- AMBROGIO, G., FILICE, L.; GAGLIARDI, F. **Improving Industrial Suitability of Incremental Sheet Forming Process**. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 58, no. 9, pp. 941–947, 2011.
- AMBROGIO, G., FILICE, L.; MICARI, F.. **A Force Measuring Based Strategy for Failure Prevention in Incremental Forming**. *Journal of Materials Processing Technology*, 177(1-3), pp. 413–416, 2006.
- AZAOUZI M.; LEBEAL N. **Tool Path Optimization for Single Point Incremental Sheet Forming Using Response Surface Method**. *Simul. Model. Pract. Theory*, vol. 24, pp. 49–58, May 2012.
- BANABIC, D. **Sheet Metal Forming Processes - Constitutive Modelling and Numerical Simulation**. 1° ed. Berlin, Alemanha: Springer-Verlag, 2010.
- BAMBACH, M.; HIRT, G.; AMES, J. **Modeling of Optimization Strategies in the Incremental CNC Sheet Metal Forming Process**. NUMIFORM, Columbus, Ohio, pp 1969-1974, 2004.
- BERTOL, L. S. **Potentialities of the use of Incremental Forming in Computer Aided Design and Manufacture of Customized Craniofacial Implants**. Theses, pp. 133, UFRGS, Porto Alegre, 2012.
- CAO, T.; LU, B.; XU, D.; ZHANG, H.; CHEN, J.; LONG, H.; CAO, J. **An Efficient Method for Thickness Prediction in Multi-Pass Incremental Sheet Forming**. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 77, no. 1–4, pp. 469–483, 2015.
- CASTELAN, J. **Estampagem Incremental do Titânio Comercialmente Puro para Aplicação em Implante Craniano**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), pp. 117, UFRGS, Porto Alegre, 2010.

CAVALER, L. C. C. **Parâmetros de Conformação para a Estampagem Incremental de Chapas de Aço Inoxidável AISI 304L**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), pp. 133, UFRGS, Porto Alegre, 2010.

CERRO, I.; MAIDAGAN, E.; ARANA, J.; RIVERO, A.; RODRÍGUEZ, P. P. **Theoretical and Experimental Analysis of the Dieless Incremental Sheet Forming Process**. *Journal of Materials Processing Technology*, 177, pp. 404–408, 2006.

DALEFFE, A. **Fabricação de Próteses Cranianas Personalizadas em Chapas de Titânio Através da Estampagem Incremental**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), pp. 119, UFRGS, Porto Alegre, 2014.

DAVARPANAH, M. A.; MIRKOU EI, A.; YU, X.; MALHOTRA, R.; PILLA, S. **Effects of Incremental Depth and Tool Rotation on Failure Modes and Microstructural Properties in Single Point Incremental Forming of Polymers**. *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 222, pp. 287–300, 2015.

DE LUCCA, G. dos S. **Análise de Forças Durante Processo de Estampagem Incremental com o Auxílio de Extensometria**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), pp. 99, UFRGS, Porto Alegre, 2015.

DUFLOU, J. R.; TUNÇKOL Y.; SZEKERES A.; VANHERCK P. **Experimental Study on Force Measurements for Single Point Incremental Forming**. *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 189, no. 1–3, pp. 65–72, Jul. 2007.

DUFLOU, J. R.; CALLEBAUT, B.; VERBERT J.; DE BAERDEMAEKER, H. **Improved SPIF Performance Through Dynamic Local Heating**. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 48, no. 5, pp. 543–549, 2008.

DUFLOU, J. R.; VANHOVE, H.; VERBERT J.; GU J.; VASILAKOS, I.; EYCKENS, P. **Twist revisited: Twist phenomena in single point incremental forming**. *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 59, no. 1, pp. 307–310, Jan. 2010.

EMMENS, W. C.; SEBASTIANI, G.; VAN DEN BOOGAARD, A. H. **The Technology of Incremental Sheet Forming—A Brief Review of the History**. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 210, n. 8, pp. 981–997, jun. 2010.

FILHO, R. A. C. **Avaliação das Deformações de Chapas Finas e Curvas CLC para Diferentes Geometrias de Punções**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), pp. 127, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

FILHO, P. S. O. **Análise Numérica e Avaliação da Predição de Forças no Processo de Estampagem Incremental de Ponto Único**. Projeto de Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), pp. 61, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

FRITZEN, D. **Estudo do Processo de Estampagem Incremental em Chapas de Latão 70/30**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), pp. 124, UFRGS, Porto Alegre, 2012.

GRONOSTAJSKI, Z. **The Constitutive Equations for FEM Analysis**. Journal of Materials Processing Technology, v. 106, pp. 40-44, 2000.

HOSFORD, W. F. **Mechanical Behavior of Materials**. 2nd. ed. New York, USA: Cambridge University Press, 2010.

HOSFORD, W. F.; CADDELL, R. M. **Metal Forming – Mechanics and Metallurgy**. 4th. ed. [S.l.]: Cambridge University Press, 2011.

HUSMANN, T.; MAGNUS, C. S. **Thermography in Incremental Forming Processes at Elevated Temperatures**. Measurement, vol. 77, pp. 16–28, Jan. 2016.

JACKSON, K.; ALLWOOD, J. **The Mechanics of Incremental Sheet Forming**. Journal of Materials Processing Technology, v. 209, n. 3, p. 1158-1174, 2009.

JESWIET, J.; MICARI, F.; HIRT G.; BRAMLEY, A.; DUFLOU, J.; ALLWOOD J. **Asymmetric Single Point Incremental Forming of Sheet Metal**. CIRP Ann. - Manuf. Technol., vol. 54, no. 2, pp. 88–114, Jan. 2005.

KEELER, S. P. **Understanding Sheet Metal Formability; Part 3 - Properties Related to Forming**. Machinery, pp. 94-103, abr. 1968.

KIM, T. J.; YANG, D. Y. **Improvement of Formability for the Incremental Sheet Metal Forming Process**. International Journal of Mechanical Sciences, vol. 42, pp. 1271- 1286, 2001.

KITAZAWA, K.; HAYASHI, S.; YAMAZAKI, S. **Hemispherical Stretch-Expanding of Aluminium Sheet by Computerized Numerically Controlled Incremental Forming Process with Two Path Method**. Journal of Japan Institute of Light Metals, vol. 46, pp. 219-224, 2001.

KITAZAWA, K.; NAKANE, M. **Hemi-ellipsoidal Stretch Expanding of Aluminium Sheet by CNC Incremental Forming Process with Two Path Method**. Journal of Japan Institute of Light Metals, vol. 47, pp. 440-445, 1997.

KUMAR, Y.; KUMAR, S. **Incremental Sheet Forming (ISF)**. Advances in Material Forming and Joining, Springer India, 2015.

KOPAC, J.; KAMPUS, Z. **Incremental Sheet Metal Forming on CNC Milling Machine-Tool**. J. Mater. Process. Technol., vol. 162–163, pp. 622–628, May 2005.

LAMMINEN, L. **Incremental Sheet Forming with an Industrial Robot – Forming Limits and Their Effect on Component Design**. Advanced Materials Research, Vols. 6-8, pp. 457-464, 2005

LEACH, D.; GREEN, A. J.; BRAMLEY, A. N. **A New Incremental Sheet Forming Process for Small Batch and Prototype Parts**. 9th International Conference on Sheet Metal, Leuven, pp. 211-218, 2001.

LESZAK, E. **Apparatus and process for incremental dieless forming**. Patent US 3342051 A, published 1967-09-19.

LIHUI, L. *et al.* **A Critical Review on Special Forming Processes and Associated Research for Lightweight Components based on Sheet and Tube Materials**. Manufacturing Rev, Beijing, China, pp. 20, set. 2014.

MALHOTRA R.; XUE L.; BELYTSCHKO T.; CAO J. **Mechanics of Fracture in Single Point Incremental Forming**. J. Mater. Process. Technol., vol. 212, no. 7, pp. 1573–1590, Jul. 2012.

MARABUTO, S. R.; SENA, J. I. V.; AFONSO, D.; MARTINS, M. A. B. E.; COELHO, R. M.; FERREIRA, J. A. F.; VALENTE, R. A. F.; SOUZA, R. J. A. de. **Estampagem Incremental: Estudo Numérico e Experimental**. Congresso de Métodos Numéricos em Engenharia 2011. Coimbra, 14 a 17 de Junho de 2011.

MATSUBARA, S. **Incremental Backward Bulge Forming of a Sheet Metal with a Hemispherical Tool**. Journal of the JSTP, vol. 35, pp. 1311-1316, 1994.

MEIER, H.; DEWALD, O.; ZHANG, J. **Development of a Robot-Based Sheet Metal Forming Process**. Steel Research, Issue 2005, Dusseldorf, 2005.

MEIER, H.; MAGNUS, C.; SMUKALA, V. **Impact of Superimposed Pressure on Dieless Incremental Sheet Metal Forming with Two Moving Tools**. CIRP Ann. - Manuf. Technol., vol. 60, no. 1, pp. 327–330, Jan. 2011.

MEIER, H.; ZHU, J.; BUFF, B.; LAURISCHKAT, R. **Cx Process Chain for Two Robots Based Incremental Sheet Metal Forming**. Procedia CIRP, vol. 3, pp. 37–42, Jan. 2012.

MONTGOMERY, D. C. **Estatística Aplicada e Probabilidade Para Engenheiros**. Editora LTC, 5ª Ed., 2012

MUGENDIRAN, V.; GNANAVELBABU, A.; RAMADOSS R. **Parameter Optimization for Surface Roughness and Wall Thickness on AA5052 Aluminium Alloy by Incremental Forming Using Response Surface Methodology**. Procedia Eng., vol. 97, pp. 1991–2000, 2014.

NAKAZIMA, K. *et al.* **Study on The Formability of Steel Sheets**. Yawata Technical Report, pp. 111-141, jul. 1968.

NEWBY, J. R. **Formability of Steel Sheet: Metals Handbook Forming and Forging**. 91. ed. [S.l.]: [s.n.], v. 14, pp. 545-560, 1988.

PANITI, I. **A Novel, Single-Robot Based Two Sided Incremental Sheet Forming System**. ISR/Robotik 2014; 41st International Symposium on Robotics; Proceedings of, pp. 1-7, Munich, Germany, 2014.

PANITI, I.; SOMLÓ J. **Novel Incremental Sheet Forming System with Tool-Path Calculation Approach**. Acta Polytech. Hungarica, vol. 11, no. 7, pp. 43–60, 2014.

PARK, J.; KIM, Y. **Fundamental Studies on the Incremental Sheet Metal Forming Technique**. Journal of Materials Processing Technology, Vol.140, pp. 447-453, 2003.

RAUCH M., J.; HASCOET, Y.; HAMANN, J. C.; PLENEL, Y. **Tool Path Programming Optimization for Incremental Sheet Forming Applications**. Comput. Des., vol. 41, no. 12, pp. 877–885, 2009.

RYAN, T. **Estatística Moderna para Engenharia**. Ed. Elsevier., pp. 325, Rio de Janeiro, 2009.

SCHAEFFER, L. **Conformação de Chapas Metálicas**. Porto Alegre, Imprensa Livre, 200p., 2004.

SCHMOECKEL, D. **Developments in Automation, Flexibilization and Control of Forming Machinery**. CIRP Ann. - Manuf. Technol., vol. 40, no. 2, pp. 615–622, Dec. 1992.

SANTOS, R. A. **Avaliação de Estampabilidade do Aço DC05 (DIN 10152) e Validação das Deformações Verdadeiras Obtidas via Simulação Numérica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), pp. 97, Setor de Tecnologia, UFPR, Curitiba, 2007.

SENA, J. I. V. **Estampagem Incremental: Um novo Conceito de Produção**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade de Aveiro, pp. 95, Portugal, Aveiro, 2009.

SILVA, M. B. *et al.* **Revisiting the Fundamentals of Single Point Incremental Forming by Means of Membrane Analysis**. Int. J. Mach. Tools Manuf. 48, pp. 73–83, 2008.

SUCHY, I. **Handbook of Die Design**. 2° ed. New York, USA: McGraw-Hill, 2006.

TIBURI, F.; **Aspectos do Processo de Estampagem Incremental**. Dissertação de Mestrado, pp. 96, UFRGS, Porto Alegre, 2007.

TSCHAETSCH, H. **Metal Forming Practise**. 7th. ed. Berlin / Germany: Springer-Verlag, 2006.

LI, Yanle *et al.* **Efficient force prediction for incremental sheet forming and experimental validation**. Int. J. Adv. Manuf. Technol., vol. 73, no. 1–4, pp. 571–587, Feb. 2014.

APÊNDICE A – ANÁLISE ESTATÍSTICA DAS DUREZAS

Dados:

Chapas ASTM A653 CS-A ; espessura 0,80mm

Dureza	D1	D2	D3	D4	D5	D6	Média
HRB	59,4	59,3	58,6	58	59,7	56,8	58,63
HRF	90,7	90,65	90,3	90	90,85	89,4	90,32

Chapas ASTM A653 CS-A ; espessura 0,43mm

Dureza	D1	D2	D3	D4	D5	D6	Média
HRB	60	60	58,4	59	59,4	57,6	59,07
HRF	91	91	90,2	90,5	90,7	89,8	90,53

Dessa forma, com o objetivo de se testar a semelhança da dureza das chapas ASTM A653 CS-A de espessuras 0,8mm e 0,43 mm, procedeu-se uma análise de variância (ANOVA) com o nível de significância em 5%. Sendo assim, μ , a média das amostras para cada tipo de chapa, respectivamente, a hipótese estudada, conforme:

$$H_0: \mu_{0,8} = \mu_{0,43}$$

$$H_1: \mu_{0,8} \neq \mu_{0,43}$$

Isto é:

H_0 : As médias de dureza são estatisticamente iguais para ambas as chapas;

H_1 : As médias de dureza são estatisticamente diferentes para pelo menos uma chapa.

ANOVA da Dureza da Chapa ASTM A653 CS-A

Varição	GL	SQ	QM	F calc.	p-valor
Tratamentos	1	0,5633	0,5633	0,54	0,478
Resíduos	10	10,3867	1,0387		
Total	11	10,9500			

Logo, a hipótese testada é válida pois $p\text{-valor} > 0,05$, ou seja, as durezas podem ser consideradas equivalentes.

APÊNDICE B – TABELA PADRÃO EXPERIMENTO FATORIAL 2⁵

Arq.	Passe	Fz_pico	Fz_med	Fxy	FR
		(N)	(N)	(N)	(N)
CP_1	1	30,28	15,81	4,33	16,39
CP_1	2	101,56	80,08	17,75	82,02
CP_1	3	167,96	135,55	35,26	140,06
CP_1	4	226,56	168,09	52,19	176,01
CP_1	5	253,90	190,75	60,67	200,16
CP_1	6	285,16	214,50	67,65	224,91
CP_1	7	308,60	236,03	76,83	248,22
CP_2	1	44,92	27,66	5,10	28,12
CP_2	2	112,30	88,44	17,51	90,16
CP_2	3	190,42	139,96	31,49	143,46
CP_2	4	243,16	176,67	43,71	182,00
CP_2	5	274,42	204,27	52,53	210,91
CP_2	6	309,58	229,54	61,55	237,64
CP_2	7	339,84	251,52	71,20	261,41
CP_3	1	32,22	17,09	3,82	17,52
CP_3	2	104,50	79,70	17,38	81,57
CP_3	3	181,64	133,59	34,26	137,91
CP_3	4	236,32	170,12	46,78	176,43
CP_3	5	270,50	196,89	54,90	204,40
CP_3	6	303,72	218,24	68,16	228,64
CP_3	7	333,98	234,78	81,05	248,37
CP_4	1	67,38	52,24	8,05	52,86
CP_4	2	144,54	111,99	21,26	114,00
CP_4	3	225,58	161,79	33,56	165,23
CP_4	4	273,44	194,29	43,83	199,17
CP_4	5	314,46	220,74	53,82	227,20
CP_4	6	347,66	244,88	64,08	253,13
CP_4	7	380,86	266,30	75,86	276,89
CP_5	1	267,58	221,80	45,79	226,47
CP_5	2	415,04	328,90	99,33	343,57
CP_5	3	507,82	401,07	143,69	426,03
CP_5	4	624,02	478,67	195,43	517,03
CP_5	5	707,04	542,89	229,46	589,39
CP_5	6	765,62	590,28	263,83	646,56
CP_5	7	829,10	640,75	298,06	706,68
CP_6	1	336,92	264,53	47,72	268,80
CP_6	2	458,00	360,48	73,21	367,84
CP_6	3	579,10	448,78	101,82	460,18
CP_6	4	683,60	525,04	130,73	541,07
CP_6	5	769,54	591,46	149,42	610,04
CP_6	6	846,68	655,25	164,89	675,68
CP_6	7	921,88	713,03	180,20	735,45
CP_7	1	256,84	206,33	47,55	211,74
CP_7	2	426,76	329,95	102,44	345,49
CP_7	3	523,44	416,60	144,39	440,92
CP_7	4	659,18	510,93	200,98	549,03
CP_7	5	766,60	585,93	254,66	638,88
CP_7	6	852,54	648,02	308,27	717,61
CP_7	7	939,46	701,80	357,94	787,81
CP_8	1	366,22	271,47	49,67	275,98
CP_8	2	469,72	371,54	72,53	378,55
CP_8	3	591,80	470,60	100,24	481,16
CP_8	4	713,86	562,50	123,90	575,99
CP_8	5	817,38	640,89	147,45	657,63
CP_8	6	912,10	707,44	172,10	728,07
CP_8	7	996,10	765,08	197,31	790,11
CP_9	1	103,52	79,38	17,89	81,37
CP_9	2	259,76	167,75	60,32	178,26
CP_9	3	349,60	215,05	95,28	235,21
CP_9	4	409,18	257,17	119,60	283,62
CP_9	5	455,08	284,76	143,66	318,95
CP_9	6	484,38	299,31	160,50	339,63
CP_9	7	503,90	305,35	166,64	347,86
CP_10	1	128,90	103,78	27,95	107,47
CP_10	2	320,32	196,11	75,55	210,16
CP_10	3	412,10	253,47	110,25	276,41
CP_10	4	493,16	297,37	147,62	332,00
CP_10	5	560,54	330,43	186,49	379,43
CP_10	6	606,44	354,33	221,03	417,62
CP_10	7				

Arq.	Passe	Fz_pico	Fz_med	Fxy	FR
		(N)	(N)	(N)	(N)
CP_11	1	84,96	68,75	14,05	70,17
CP_11	2	273,44	169,48	60,60	179,99
CP_11	3	391,60	233,93	94,56	252,32
CP_11	4	468,76	270,95	129,71	300,39
CP_11	5	523,44	295,24	164,29	337,88
CP_11	6	565,42	314,07	193,52	368,90
CP_11	7	588,86	325,50	217,08	391,24
CP_12	1	125,98	98,74	19,63	100,67
CP_12	2	343,76	200,31	58,26	208,61
CP_12	3	452,14	264,28	87,27	278,31
CP_12	4	547,86	310,33	120,15	332,78
CP_12	5	627,92	346,10	154,99	379,22
CP_12	6	684,58	378,42	189,38	423,17
CP_12	7	725,58	403,01	219,69	459,00
CP_13	1	415,04	340,04	91,82	352,22
CP_13	2	683,60	527,13	185,30	558,75
CP_13	3	887,70	641,53	294,57	705,93
CP_13	4	1035,16	727,28	364,06	813,31
CP_13	5	1133,78	801,27	403,89	897,30
CP_13	6	1206,06	853,24	430,50	955,69
CP_13	7	1242,18	881,30	448,07	988,67
CP_14	1	480,46	393,05	94,02	404,14
CP_14	2	779,30	573,75	165,00	597,00
CP_14	3	1001,96	703,75	236,08	742,30
CP_14	4	1172,86	828,08	280,49	874,29
CP_14	5	1305,66	922,25	320,95	976,50
CP_14	6	1396,48	981,08	368,33	1047,94
CP_14	7	1446,28	1013,39	403,62	1090,81
CP_15	1	434,58	342,53	91,47	354,54
CP_15	2	723,64	531,50	198,60	567,39
CP_15	3	983,40	679,81	281,05	735,61
CP_15	4	1169,92	789,81	351,70	864,58
CP_15	5				
CP_15	6	1375,98	888,61	468,44	1004,52
CP_15	7	1417,96	900,36	512,76	1036,13
CP_16	1	509,76	403,78	99,13	415,77
CP_16	2	849,60	606,00	163,45	627,66
CP_16	3	1122,08	774,55	233,18	808,89
CP_16	4	1335,94	895,21	295,44	942,70
CP_16	5	1498,04	976,18	363,54	1041,68
CP_16	6	1610,36	1028,50	430,51	1114,97
CP_16	7	1681,64	1054,61	491,38	1163,47
CP_17	1	17,58	4,43	3,52	5,66
CP_17	2	87,90	69,44	13,23	70,69
CP_17	3	160,16	124,65	29,99	128,21
CP_17	4	213,86	154,75	43,95	160,87
CP_17	5	238,28	178,72	50,57	185,73
CP_17	6	269,54	203,90	57,88	211,96
CP_17	7	292,00	222,41	67,46	232,42
CP_18	1	65,42	42,20	7,47	42,85
CP_18	2	133,78	102,39	23,33	105,01
CP_18	3	204,10	147,97	38,14	152,80
CP_18	4	247,08	182,14	48,10	188,38
CP_18	5	281,26	210,44	57,45	218,14
CP_18	6	317,38	234,23	67,17	243,68
CP_18	7	345,70	255,50	78,66	267,34
CP_19	1	15,62	3,47	3,34	4,82
CP_19	2	89,84	63,70	14,55	65,34
CP_19	3	162,10	121,49	35,88	126,68
CP_19	4	233,40	162,22	53,06	170,68
CP_19	5	264,64	192,98	65,84	203,91
CP_19	6	299,80	215,47	81,25	230,28
CP_19	7	330,08	233,72	99,76	254,12
CP_20	1	56,64	30,59	6,06	31,18
CP_20	2	110,36	91,59	20,06	93,76
CP_20	3	196,28	145,45	34,75	149,54
CP_20	4	255,86	183,47	47,01	189,39
CP_20	5	291,02	212,71	57,20	220,27
CP_20	6	333,98	238,79	68,59	248,45
CP_20	7	369,14	261,12	80,09	273,12

Arq.	Passe	Fz_pico (N)	Fz_med (N)	Fxy (N)	FR (N)
CP_21	1	235,36	190,21	39,75	194,32
CP_21	2	410,16	317,74	101,88	333,67
CP_21	3	498,04	394,65	153,92	423,60
CP_21	4	615,24	473,41	205,44	516,06
CP_21	5	692,38	536,01	239,89	587,24
CP_21	6	757,82	581,84	274,68	643,42
CP_21	7	821,28	630,81	307,97	701,97
CP_22	1	341,80	270,89	49,25	275,33
CP_22	2	456,06	362,30	72,48	369,48
CP_22	3	582,04	455,76	102,03	467,04
CP_22	4	696,28	535,84	131,88	551,83
CP_22	5	776,36	604,53	152,60	623,49
CP_22	6	856,44	668,79	169,14	689,85
CP_22	7	933,60	727,55	185,38	750,80
CP_23	1	279,30	211,04	45,19	215,82
CP_23	2				
CP_23	3	543,94	428,55	174,07	462,55
CP_23	4	681,64	515,16	241,73	569,05
CP_23	5	774,42	587,30	298,36	658,75
CP_23	6	861,32	653,71	344,66	739,01
CP_23	7	952,14	706,64	387,60	805,96
CP_24	1	342,78	279,04	51,52	283,75
CP_24	2	472,66	378,24	75,51	385,70
CP_24	3	617,18	487,44	106,92	499,03
CP_24	4	747,08	586,17	132,74	601,01
CP_24	5	851,56	667,90	158,05	686,34
CP_24	6	947,26	736,21	183,79	758,80
CP_24	7	1037,10	794,61	209,22	821,69
CP_25	1	95,70	78,09	19,22	80,42
CP_25	2	261,72	168,24	66,45	180,89
CP_25	3	350,58	215,38	103,24	238,84
CP_25	4	412,10	255,21	134,10	288,30
CP_25	5	461,92	282,21	162,30	325,55
CP_25	6	493,16	133,16	82,86	156,84
CP_25	7	370,12	164,64	190,54	251,82
CP_26	1	124,02	96,58	19,60	98,55
CP_26	2	321,28	191,77	59,26	200,71
CP_26	3	414,06	251,52	86,37	265,93
CP_26	4	492,18	296,99	116,08	318,87
CP_26	5	559,58	330,70	143,91	360,66
CP_26	6	603,52	354,45	165,87	391,34
CP_26	7	631,84	367,76	178,85	408,95
CP_27	1	103,52	73,95	15,75	75,61
CP_27	2	288,08	176,09	65,63	187,93
CP_27	3	404,30	238,52	98,74	258,15
CP_27	4	472,66	274,51	132,77	304,93
CP_27	5	531,26	298,37	164,96	340,94
CP_27	6	571,28	316,63	190,88	369,72
CP_27	7	593,76	327,61	208,92	388,56
CP_28	1	147,46	112,34	23,98	114,87
CP_28	2	377,92	225,04	69,98	235,66
CP_28	3	492,18	292,36	102,92	309,95
CP_28	4	594,72	340,71	138,78	367,89
CP_28	5	673,82	377,78	176,79	417,10
CP_28	6	739,26	412,11	213,89	464,31
CP_28	7	777,34	437,50	247,11	502,46
CP_29	1	416,02	328,65	86,63	339,87
CP_29	2	670,90	513,45	178,09	543,45
CP_29	3	869,14	630,13	287,27	692,52
CP_29	4	1019,54	717,59	361,24	803,38
CP_29	5	1128,90	792,35	402,28	888,62
CP_29	6	1193,36	846,50	434,71	951,60
CP_29	7				
CP_30	1	513,68	400,27	98,84	412,29
CP_30	2	774,42	571,14	166,92	595,03
CP_30	3	988,28	701,59	240,63	741,70
CP_30	4	1158,20	827,13	286,45	875,33
CP_30	5	1303,72	922,74	330,88	980,27
CP_30	6	1404,30	983,06	379,00	1053,58
CP_30	7	1466,80	1016,16	412,86	1096,83
CP_31	1	472,66	358,68	98,08	371,85
CP_31	2	744,14	543,02	204,13	580,12
CP_31	3	990,24	689,86	288,59	747,79
CP_31	4	1181,64	801,06	361,17	878,72
CP_31	5	1305,66	866,73	422,91	964,40
CP_31	6	1383,78	899,98	479,94	1019,96
CP_31	7	1435,54	910,47	525,51	1051,25
CP_32	1	537,10	405,62	100,81	417,96
CP_32	2	856,44	608,82	166,84	631,27
CP_32	3	1126,96	777,06	237,34	812,50
CP_32	4	1333,98	898,70	298,22	946,89
CP_32	5	1501,96	980,40	363,17	1045,51
CP_32	6	1609,38	1031,53	429,56	1117,40
CP_32	7	1682,62	1058,89	490,35	1166,92
CP_33	1	27,34	15,47	5,25	16,33
CP_33	2	90,82	73,85	18,09	76,04
CP_33	3	160,16	124,18	35,88	129,26
CP_33	4	211,92	151,10	54,14	160,51
CP_33	5	235,36	173,70	64,94	185,45
CP_33	6	261,72	197,74	71,20	210,17
CP_33	7	289,06	217,08	80,99	231,70
CP_34	1	92,78	70,01	11,88	71,01
CP_34	2	162,10	125,31	26,93	128,17
CP_34	3	232,42	167,23	39,66	171,87
CP_34	4	265,62	199,40	49,73	205,51
CP_34	5	302,74	226,34	59,48	234,02
CP_34	6	339,84	251,33	73,64	261,90
CP_34	7	370,12	273,75	89,46	288,00
CP_35	1	27,34	12,60	3,38	13,04
CP_35	2	95,70	75,26	15,13	76,77
CP_35	3	171,88	129,76	32,06	133,66
CP_35	4	235,36	168,22	45,59	174,29
CP_35	5	269,54	195,70	54,98	203,27
CP_35	6	300,78	217,64	64,53	227,01
CP_35	7	329,10	234,81	75,54	246,67
CP_36	1	58,60	45,14	6,95	45,67
CP_36	2	130,86	103,53	20,16	105,47
CP_36	3	208,98	152,58	32,00	155,90
CP_36	4	259,76	187,41	42,42	192,15
CP_36	5	300,78	215,70	52,41	221,97
CP_36	6	340,82	241,00	63,43	249,21
CP_36	7	376,96	263,00	75,27	273,56
CP_37	1	314,46	232,52	58,34	239,73
CP_37	2	421,88	325,47	98,80	340,14
CP_37	3	506,84	402,53	142,75	427,09
CP_37	4	607,42	482,79	195,10	520,72
CP_37	5	698,24	545,61	236,02	594,47
CP_37	6	762,70	592,45	270,62	651,34
CP_37	7	822,26	637,63	299,64	704,53
CP_38	1	337,90	266,31	49,01	270,78
CP_38	2	459,96	362,53	75,53	370,32
CP_38	3	583,98	452,59	104,36	464,46
CP_38	4	689,46	531,93	134,22	548,60
CP_38	5	767,58	598,16	152,41	617,27
CP_38	6	849,60	661,65	166,77	682,34
CP_38	7	919,92	719,18	182,14	741,88
CP_39	1	255,86	205,21	45,28	210,15
CP_39	2	434,58	335,25	99,59	349,72
CP_39	3	529,30	423,00	139,44	445,39
CP_39	4	666,02	513,21	188,14	546,61
CP_39	5	756,84	580,14	239,62	627,68
CP_39	6	838,86	643,33	291,59	706,33
CP_39	7	920,90	696,71	332,80	772,11
CP_40	1	387,70	287,97	54,33	293,06
CP_40	2	479,50	380,82	76,59	388,44
CP_40	3	628,90	486,66	105,42	497,95
CP_40	4	755,86	582,39	132,34	597,24
CP_40	5	859,38	661,78	157,62	680,29
CP_40	6	948,24	728,78	182,78	751,36
CP_40	7	1035,16	786,74	209,14	814,06

Arq.	Passe	Fz_pico	Fz_med	Fxy	FR
		(N)	(N)	(N)	(N)
CP_41	1	81,06	60,89	12,68	62,20
CP_41	2	244,14	159,63	61,27	170,99
CP_41	3	346,68	211,66	99,56	233,91
CP_41	4	404,30	252,51	131,25	284,59
CP_41	5	457,04	279,16	164,03	323,79
CP_41	6	497,08	292,94	189,34	348,80
CP_41	7	515,62	297,48	203,96	360,68
CP_42	1	122,08	101,14	22,14	103,53
CP_42	2	321,28	194,66	63,06	204,62
CP_42	3				
CP_42	4	494,14	299,76	118,95	322,50
CP_42	5	559,58	334,13	147,19	365,11
CP_42	6	600,58	357,04	169,56	395,26
CP_42	7	625,00	369,22	181,18	411,28
CP_43	1	88,86	59,35	11,74	60,50
CP_43	2	270,50	165,05	59,54	175,46
CP_43	3				
CP_43	4	466,80	271,64	127,48	300,07
CP_43	5	527,34	296,15	161,46	337,30
CP_43	6	567,38	314,48	189,08	366,95
CP_43	7	593,76	326,26	208,19	387,02
CP_44	1	130,86	101,84	21,37	104,06
CP_44	2	344,72	203,76	61,46	212,83
CP_44	3	453,12	266,60	91,25	281,78
CP_44	4	549,80	312,56	125,08	336,66
CP_44	5	631,84	348,73	161,36	384,25
CP_44	6	690,42	380,52	199,56	429,67
CP_44	7				
CP_45	1	408,20	326,27	82,43	336,52
CP_45	2				
CP_45	3	891,60	646,42	290,84	708,84
CP_45	4	1039,06	734,16	363,77	819,34
CP_45	5	1136,72	808,91	401,47	903,06
CP_45	6	1208,98	860,10	429,54	961,40
CP_45	7	1264,64	887,77	443,77	992,50
CP_46	1	491,22	394,03	95,47	405,43
CP_46	2	791,02	572,57	166,27	596,23
CP_46	3	1008,78	705,21	237,22	744,04
CP_46	4	1178,72	831,30	281,15	877,56
CP_46	5	1305,66	925,58	328,44	982,12
CP_46	6	1394,54	986,36	374,19	1054,96
CP_46	7	1450,20	1019,32	407,95	1097,92
CP_47	1	467,78	357,35	97,45	370,40
CP_47	2	751,96	551,68	204,20	588,25
CP_47	3	1007,82	705,67	286,53	761,62
CP_47	4	1198,24	818,30	360,33	894,12
CP_47	5	1346,68	885,76	425,55	982,68
CP_47	6	1435,54	920,65	485,59	1040,86
CP_47	7	1480,46	933,07	534,37	1075,25
CP_48	1	534,18	406,90	100,73	419,19
CP_48	2	862,30	611,26	165,61	633,30
CP_48	3	1125,98	776,56	234,27	811,13
CP_48	4	1326,18	895,37	296,47	943,18
CP_48	5	1491,22	974,72	363,71	1040,36
CP_48	6	1598,64	1024,05	428,01	1109,90
CP_48	7	1676,76	1049,37	486,94	1156,84
CP_49	1	21,48	10,21	3,75	10,88
CP_49	2	91,80	73,30	16,48	75,13
CP_49	3	162,10	127,33	35,57	132,20
CP_49	4	212,90	155,75	51,64	164,08
CP_49	5	243,16	179,43	58,66	188,78
CP_49	6	273,44	203,23	66,48	213,83
CP_49	7	295,90	223,04	76,73	235,87
CP_50	1	51,76	36,43	6,88	37,07
CP_50	2	126,96	98,71	22,90	101,33
CP_50	3	207,04	147,97	38,11	152,80
CP_50	4	248,04	181,13	48,62	187,54
CP_50	5	280,28	208,82	58,09	216,75
CP_50	6	319,34	233,54	68,29	243,32
CP_50	7	347,66	254,82	78,84	266,74

Arq.	Passe	Fz_pico	Fz_med	Fxy	FR
		(N)	(N)	(N)	(N)
CP_51	1	50,78	28,97	4,83	29,37
CP_51	2	111,32	86,63	20,09	88,93
CP_51	3	170,90	133,27	36,05	138,06
CP_51	4	219,72	167,37	49,57	174,56
CP_51	5	263,68	194,50	60,41	203,66
CP_51	6	296,88	216,24	72,99	228,22
CP_51	7	325,20	233,77	87,20	249,51
CP_52	1	58,60	41,17	7,37	41,83
CP_52	2	142,58	111,51	24,22	114,11
CP_52	3	237,30	172,13	40,71	176,88
CP_52	4	289,06	210,31	52,49	216,76
CP_52	5	328,12	240,61	62,86	248,68
CP_52	6	374,02	267,67	75,06	278,00
CP_52	7	410,16	290,67	87,83	303,65
CP_53	1	253,90	198,08	46,41	203,45
CP_53	2	419,92	322,72	93,47	335,98
CP_53	3	513,68	398,46	132,51	419,91
CP_53	4	618,16	478,59	181,72	511,93
CP_53	5	701,18	541,41	223,50	585,73
CP_53	6	765,62	589,29	265,01	646,13
CP_53	7	821,28	638,68	298,87	705,15
CP_54	1	369,14	270,68	49,87	275,24
CP_54	2	451,18	358,45	73,15	365,84
CP_54	3	569,34	448,69	102,55	460,26
CP_54	4	672,86	527,33	132,91	543,82
CP_54	5	750,00	593,30	151,99	612,46
CP_54	6	830,08	656,64	167,49	677,66
CP_54	7	911,14	715,09	183,94	738,37
CP_55	1	288,08	203,92	46,61	209,18
CP_55	2	424,80	329,13	114,73	348,56
CP_55	3	528,32	420,86	167,55	452,99
CP_55	4	664,06	507,23	231,74	557,66
CP_55	5	750,98	580,62	283,74	646,24
CP_55	6	844,72	645,22	329,08	724,30
CP_55	7	935,54	699,74	374,98	793,88
CP_56	1	349,60	270,48	49,48	274,97
CP_56	2	479,50	374,12	73,90	381,35
CP_56	3	619,14	479,89	100,78	490,36
CP_56	4	750,98	578,06	126,89	591,82
CP_56	5	846,68	659,30	154,41	677,14
CP_56	6	938,48	727,66	180,57	749,73
CP_56	7	1025,40	786,81	207,79	813,79
CP_57	1	85,94	59,04	13,17	60,49
CP_57	2	250,00	162,40	63,03	174,20
CP_57	3	356,44	216,06	100,63	238,35
CP_57	4	406,26	257,52	128,77	287,92
CP_57	5	455,08	284,83	153,43	323,52
CP_57	6	490,24	299,32	170,05	344,25
CP_57	7	508,78	305,80	176,74	353,21
CP_58	1	119,14	103,37	25,74	106,53
CP_58	2	322,26	196,22	63,39	206,20
CP_58	3	418,94	254,84	90,72	270,51
CP_58	4	495,12	300,00	120,42	323,26
CP_58	5	559,58	334,12	149,17	365,90
CP_58	6	605,46	357,88	171,17	396,70
CP_58	7	629,88	371,13	183,64	414,07
CP_59	1	102,54	76,82	18,26	78,96
CP_59	2	276,36	171,15	65,17	183,14
CP_59	3	386,72	232,67	99,29	252,97
CP_59	4	460,94	268,95	134,48	300,69
CP_59	5	516,60	292,76	168,43	337,75
CP_59	6	557,62	309,81	200,25	368,89
CP_59	7	580,08	320,67	225,26	391,88
CP_60	1	140,62	105,16	21,77	107,39
CP_60	2	341,80	202,95	61,25	211,99
CP_60	3	451,18	265,64	91,38	280,92
CP_60	4	546,88	310,61	125,57	335,03
CP_60	5	627,92	346,84	160,36	382,12
CP_60	6	686,52	379,39	193,71	425,98
CP_60	7	723,64	403,59	223,85	461,51

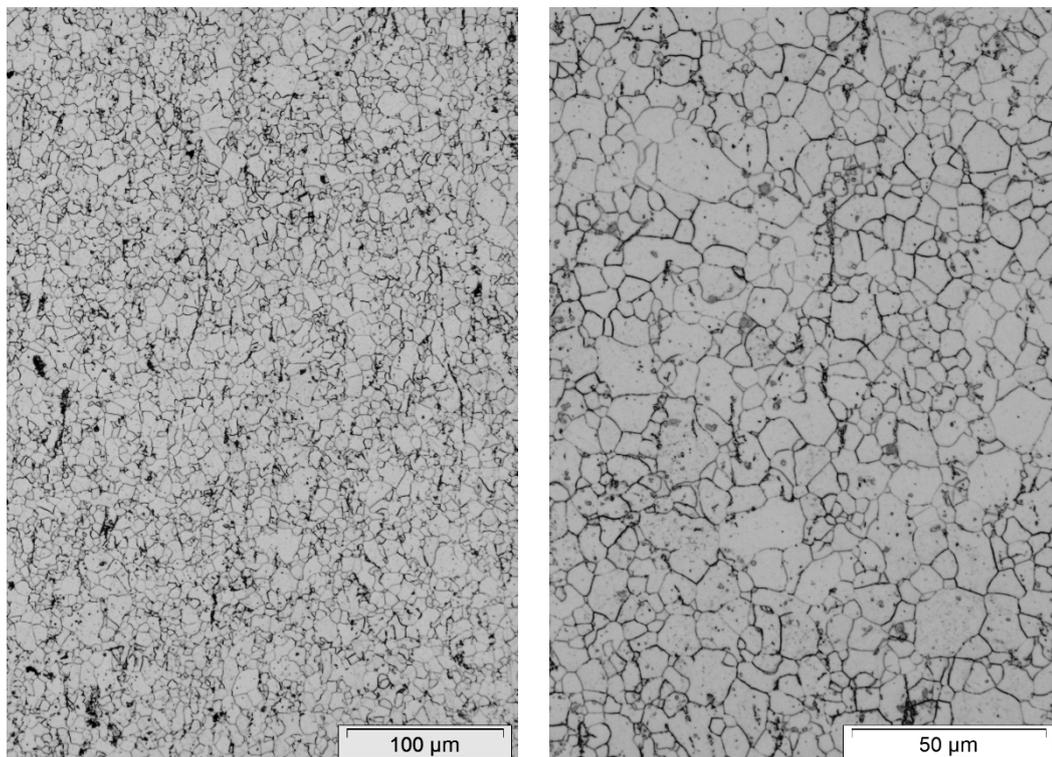
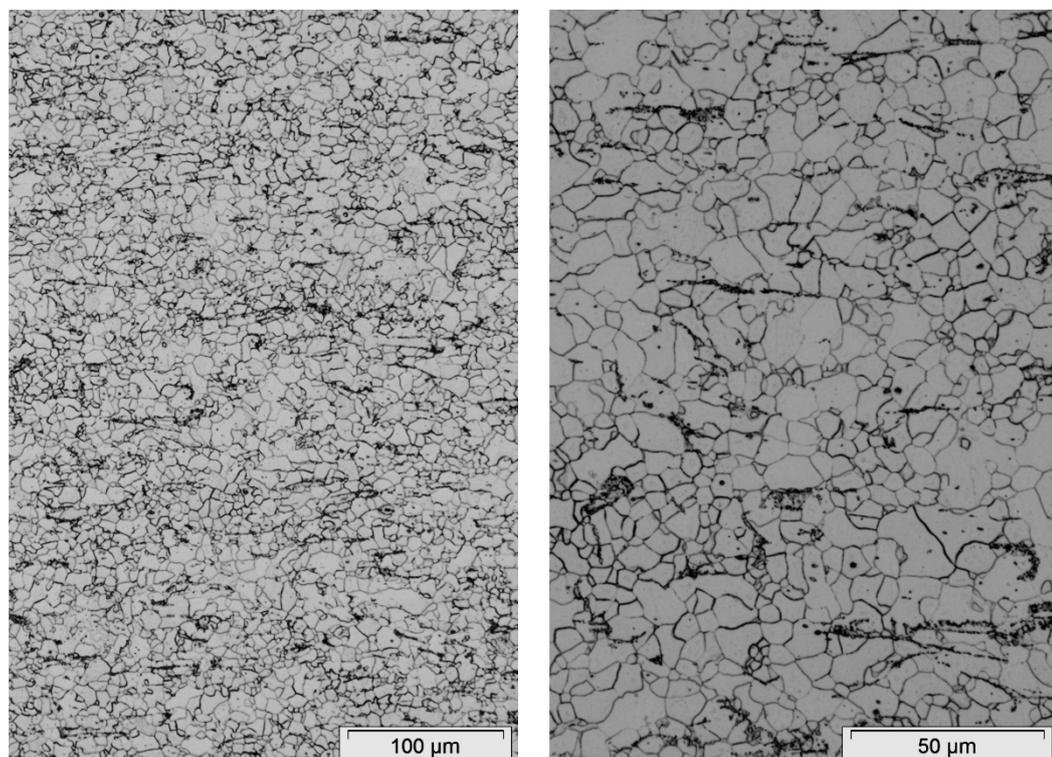
Arq.	Passe	Fz_pico	Fz_med	Fxy	FR
		(N)	(N)	(N)	(N)
CP_61	1	419,92	333,43	91,17	345,67
CP_61	2	679,68	522,06	186,10	554,24
CP_61	3	875,98	636,13	304,22	705,13
CP_61	4	1023,44	723,87	377,45	816,37
CP_61	5	1124,02	800,09	407,21	897,76
CP_61	6	1201,18	851,41	439,31	958,06
CP_61	7	1244,14	879,77	458,36	992,01
CP_62	1	490,24	399,72	97,84	411,52
CP_62	2	792,00	577,95	167,49	601,73
CP_62	3	1018,56	710,34	241,13	750,15
CP_62	4	1186,52	835,14	285,92	882,73
CP_62	5	1324,22	930,03	331,25	987,26
CP_62	6	1412,10	991,35	376,56	1060,46
CP_62	7	1465,82	1024,84	412,05	1104,57
CP_63	1	456,06	347,98	93,47	360,31
CP_63	2	727,54	540,24	203,45	577,28
CP_63	3	969,72	686,27	296,30	747,50
CP_63	4	1162,10	795,68	373,92	879,16
CP_63	5	1300,78	862,86	434,36	966,02
CP_63	6	1378,90	898,92	488,36	1023,01
CP_63	7	1423,82	906,82	533,28	1052,01
CP_64	1	505,86	395,55	97,54	407,40
CP_64	2	845,70	603,89	163,90	625,73
CP_64	3	1111,32	776,75	232,26	810,73
CP_64	4	1318,36	903,45	293,76	950,01
CP_64	5	1481,44	985,43	360,85	1049,42
CP_64	6	1602,54	1036,16	428,17	1121,14
CP_64	7	1687,50	1062,37	488,60	1169,34
CP_65	1	31,26	16,32	6,03	17,40
CP_65	2	97,66	75,64	17,06	77,54
CP_65	3	164,06	126,25	33,27	130,56
CP_65	4				
CP_65	5	242,18	175,66	56,03	184,38
CP_65	6	270,50	198,54	62,82	208,24
CP_65	7	290,04	217,58	71,73	229,10
CP_66	1	55,66	37,75	5,86	38,21
CP_66	2	124,02	95,72	19,14	97,61
CP_66	3	203,12	144,02	32,21	147,57
CP_66	4	249,02	176,10	42,18	181,08
CP_66	5	279,30	203,38	51,09	209,69
CP_66	6	311,52	226,73	60,96	234,78
CP_66	7	345,70	247,34	72,12	257,64
CP_67	1	32,22	13,35	4,25	14,01
CP_67	2	94,72	74,05	15,94	75,75
CP_67	3	162,10	126,00	33,01	130,25
CP_67	4	219,72	161,67	48,75	168,86
CP_67	5	251,96	189,41	60,74	198,91
CP_67	6	289,06	212,85	74,57	225,54
CP_67	7	316,40	229,98	90,87	247,28
CP_68	1	64,46	48,00	7,37	48,56
CP_68	2	145,50	111,13	23,45	113,58
CP_68	3	230,46	162,72	37,44	166,97
CP_68	4	274,42	196,52	47,50	202,18
CP_68	5	311,52	223,71	56,86	230,82
CP_68	6	352,54	248,27	67,40	257,25
CP_68	7	384,76	269,68	80,39	281,40
CP_69	1	266,60	217,80	46,46	222,70
CP_69	2	418,94	326,76	104,71	343,13
CP_69	3	501,96	402,12	154,52	430,79
CP_69	4	619,14	483,15	208,27	526,13
CP_69	5	706,06	544,28	245,25	596,99
CP_69	6	762,70	590,66	279,60	653,49
CP_69	7	824,22	642,78	307,54	712,56
CP_70	1	345,70	278,44	52,29	283,31
CP_70	2	466,80	367,27	75,92	375,03
CP_70	3	586,92	455,52	104,71	467,39
CP_70	4	686,52	532,82	134,50	549,53
CP_70	5	765,62	598,49	153,22	617,79
CP_70	6	844,72	661,14	168,08	682,17
CP_70	7	916,02	719,03	182,48	741,82

Arq.	Passe	Fz_pico	Fz_med	Fxy	FR
		(N)	(N)	(N)	(N)
CP_71	1	274,42	202,35	40,89	206,44
CP_71	2	427,74	328,72	90,99	341,09
CP_71	3	531,26	416,84	128,04	436,06
CP_71	4	653,32	506,56	171,06	534,67
CP_71	5	750,98	573,25	207,23	609,56
CP_71	6	837,90	635,54	260,32	686,79
CP_71	7	911,14	692,12	297,78	753,47
CP_72	1	374,02	274,33	51,29	279,08
CP_72	2	468,76	373,40	73,35	380,54
CP_72	3	615,24	477,11	99,45	487,37
CP_72	4	742,18	573,55	124,79	586,97
CP_72	5	846,68	654,34	149,97	671,30
CP_72	6	938,48	721,51	174,73	742,37
CP_72	7	1024,42	779,71	199,63	804,86
CP_73	1	99,60	77,83	18,90	80,09
CP_73	2	269,54	170,64	66,12	183,01
CP_73	3	357,42	218,75	99,60	240,36
CP_73	4	409,18	259,27	123,38	287,13
CP_73	5	451,18	283,68	150,36	321,06
CP_73	6	486,32	296,49	167,80	340,69
CP_73	7	500,98	300,41	174,36	347,34
CP_74	1	117,18	93,56	19,36	95,54
CP_74	2	327,14	193,45	60,80	202,78
CP_74	3	497,08	297,31	117,20	319,57
CP_74	4	497,08	297,31	117,20	319,57
CP_74	5	559,58	331,35	146,16	362,15
CP_74	6	605,46	354,20	169,66	392,74
CP_74	7	631,84	365,38	184,08	409,13
CP_75	1	104,50	75,45	17,77	77,51
CP_75	2	288,08	174,03	66,48	186,30
CP_75	3	397,46	234,25	102,01	255,50
CP_75	4	462,90	270,44	138,54	303,86
CP_75	5	519,54	293,64	176,44	342,57
CP_75	6	563,48	310,21	211,33	375,35
CP_75	7	585,94	320,19	240,49	400,45
CP_76	1	146,48	107,37	22,16	109,63
CP_76	2	341,80	204,37	61,19	213,33
CP_76	3	445,32	265,66	90,75	280,73
CP_76	4	540,04	311,80	122,49	335,00
CP_76	5	619,14	347,72	155,44	380,88
CP_76	6	672,86	379,09	188,07	423,18
CP_76	7	714,84	401,95	217,15	456,85
CP_77	1	420,90	345,03	92,97	357,33
CP_77	2	689,46	527,25	184,98	558,76
CP_77	3	896,48	644,74	298,35	710,43
CP_77	4	1039,06	731,89	371,77	820,90
CP_77	5	1160,16	808,36	407,77	905,39
CP_77	6	1216,80	861,23	433,85	964,34
CP_77	7	1266,60	890,06	452,56	998,51
CP_78	1	484,38	395,50	97,33	407,30
CP_78	2	766,60	558,30	159,19	580,55
CP_78	3	984,38	687,15	232,15	725,30
CP_78	4	1154,30	810,01	275,35	855,53
CP_78	5	1286,14	905,48	320,25	960,44
CP_78	6	1371,10	966,38	365,22	1033,10
CP_78	7	1429,68	1000,56	400,24	1077,64
CP_79	1	396,48	356,47	95,69	369,09
CP_79	2	743,16	554,34	203,21	590,41
CP_79	3	984,38	704,60	301,89	766,56
CP_79	4	1185,54	815,64	376,30	898,26
CP_79	5	1307,62	882,58	436,88	984,79
CP_79	6	1399,42	916,03	485,05	1036,53
CP_79	7	1442,38	922,34	530,26	1063,91
CP_80	1	521,48	397,83	97,78	409,67
CP_80	2	841,80	598,98	163,44	620,88
CP_80	3	1107,42	765,08	231,13	799,23
CP_80	4	1312,50	887,25	294,59	934,88
CP_80	5	1467,78	968,22	362,78	1033,95
CP_80	6	1586,92	1019,31	427,73	1105,42
CP_80	7	1667,00	1046,98	487,25	1154,81

Arq.	Passe	Fz_pico	Fz_med	Fxy	FR
		(N)	(N)	(N)	(N)
CP_81	1	16,60	3,48	3,14	4,68
CP_81	2	84,96	64,30	13,77	65,76
CP_81	3	158,20	119,02	30,98	122,99
CP_81	4	217,78	152,42	47,51	159,65
CP_81	5	241,22	176,09	56,24	184,85
CP_81	6	270,50	200,78	63,44	210,57
CP_81	7	294,92	220,35	73,33	232,23
CP_82	1	53,72	39,99	7,51	40,69
CP_82	2	131,84	102,98	23,25	105,57
CP_82	3	209,96	152,49	38,23	157,21
CP_82	4	250,00	183,04	48,15	189,27
CP_82	5	286,14	209,74	57,16	217,39
CP_82	6	321,28	234,24	68,39	244,02
CP_82	7	347,66	255,32	80,07	267,58
CP_83	1	21,48	4,53	3,64	5,81
CP_83	2	91,80	67,87	17,56	70,11
CP_83	3	167,96	123,78	40,71	130,30
CP_83	4	230,46	162,78	58,25	172,89
CP_83	5	266,60	191,75	75,73	206,17
CP_83	6	306,64	215,80	95,42	235,95
CP_83	7	338,86	233,37	116,07	260,64
CP_84	1	72,26	55,29	8,39	55,92
CP_84	2	154,30	120,55	23,31	122,78
CP_84	3	240,24	173,74	36,31	177,49
CP_84	4	290,04	209,64	47,22	214,89
CP_84	5	331,06	239,14	57,43	245,94
CP_84	6	374,02	265,77	69,36	274,68
CP_84	7	411,14	288,38	82,06	299,83
CP_85	1	302,74	208,87	47,21	214,14
CP_85	2	435,54	331,12	100,76	346,11
CP_85	3	519,54	403,84	139,69	427,32
CP_85	4	628,90	482,23	203,46	523,40
CP_85	5	711,92	550,00	246,54	602,73
CP_85	6	775,40	595,71	275,81	656,46
CP_85	7	834,96	642,41	307,81	712,35
CP_86	1	342,78	265,00	48,88	269,47
CP_86	2	463,86	361,38	76,12	369,31
CP_86	3	583,98	454,22	106,42	466,52
CP_86	4	690,42	531,83	136,89	549,17
CP_86	5	764,64	598,05	154,70	617,74
CP_86	6	840,82	661,46	169,82	682,91
CP_86	7	917,96	719,80	186,49	743,57
CP_87	1	305,66	215,27	45,16	219,95
CP_87	2	443,36	339,91	106,89	356,32
CP_87	3	541,02	433,35	151,50	459,07
CP_87	4	668,94	523,16	204,71	561,79
CP_87	5	765,62	593,16	253,62	645,10
CP_87	6	857,42	657,97	304,68	725,09
CP_87	7	931,64	711,82	351,48	793,86
CP_88	1	357,42	267,59	48,86	272,02
CP_88	2	462,90	367,46	74,18	374,87
CP_88	3	597,66	471,18	101,36	481,96
CP_88	4	724,60	564,37	127,11	578,51
CP_88	5	819,34	643,36	152,21	661,12
CP_88	6	909,18	711,14	178,62	733,23
CP_88	7	992,18	770,18	204,39	796,84
CP_89	1	79,10	59,92	12,14	61,14
CP_89	2	245,12	159,44	57,25	169,40
CP_89	3	345,70	210,65	91,11	229,51
CP_89	4	399,42	251,45	114,18	276,17
CP_89	5	444,34	278,32	139,29	311,23
CP_89	6	483,40	291,92	155,64	330,82
CP_89	7	498,04	297,38	161,19	338,25
CP_90	1	128,90	101,39	23,52	104,08
CP_90	2	327,14	195,05	62,71	204,88
CP_90	3	417,00	253,94	90,32	269,52
CP_90	4	496,10	299,26	120,39	322,57
CP_90	5	566,40	333,17	149,26	365,07
CP_90	6	607,42	356,53	171,22	395,52
CP_90	7	634,76	369,68	183,89	412,89

Arq.	Passe	Fz_pico	Fz_med	Fxy	FR
		(N)	(N)	(N)	(N)
CP_91	1	101,56	80,67	19,45	82,98
CP_91	2	289,06	177,92	66,99	190,11
CP_91	3	391,60	236,30	101,45	257,16
CP_91	4	464,84	272,90	137,60	305,63
CP_91	5	523,44	296,73	172,10	343,02
CP_91	6	563,48	313,01	202,71	372,92
CP_91	7	588,86	322,19	223,44	392,09
CP_92	1	149,42	108,92	24,44	111,62
CP_92	2	336,92	203,49	62,17	212,78
CP_92	3	449,22	266,62	92,56	282,23
CP_92	4	545,90	311,89	125,46	336,18
CP_92	5	629,88	348,32	160,05	383,33
CP_92	6	687,50	381,46	193,98	427,95
CP_92	7	725,58	406,06	223,66	463,58
CP_93	1	425,78	339,40	92,34	351,73
CP_93	2	685,54	527,28	184,70	558,69
CP_93	3	884,76	645,89	301,97	713,00
CP_93	4	1030,28	735,87	381,10	828,70
CP_93	5	1145,50	812,91	415,79	913,08
CP_93	6	1213,86	865,48	443,64	972,55
CP_93	7	1269,54	895,05	459,84	1006,27
CP_94	1	524,42	421,15	102,59	433,46
CP_94	2	795,90	593,91	167,69	617,13
CP_94	3	1029,30	729,46	241,01	768,24
CP_94	4	1204,10	855,90	287,57	902,91
CP_94	5	1350,58	954,09	336,38	1011,65
CP_94	6	1448,24	1017,97	385,60	1088,55
CP_94	7	1508,78	1052,40	420,78	1133,41
CP_95	1	445,32	342,77	98,22	356,57
CP_95	2	736,32	534,33	208,41	573,54
CP_95	3	976,56	678,69	303,64	743,51
CP_95	4	1163,08	789,48	375,78	874,35
CP_95	5	1287,10	857,79	434,29	961,47
CP_95	6	1370,12	890,47	495,67	1019,13
CP_95	7	1417,96	899,23	540,40	1049,12
CP_96	1	509,76	396,36	97,93	408,28
CP_96	2	828,12	605,39	168,62	628,44
CP_96	3	1105,46	776,91	238,19	812,60
CP_96	4	1326,18	902,71	301,74	951,80
CP_96	5	1490,24	984,67	369,29	1051,64
CP_96	6	1606,44	1035,96	435,06	1123,61
CP_96	7	1695,32	1062,96	495,84	1172,92
CP_97	1	265,62	202,48	45,64	207,56
CP_97	2	421,88	309,19	84,93	320,64
CP_97	3	549,80	391,13	119,64	409,02
CP_97	4	654,30	463,39	144,78	485,48
CP_97	5	734,38	517,04	171,36	544,70
CP_97	6	806,64	557,32	200,04	592,13
CP_97	7	853,52	585,36	227,52	628,03
CP_98	1	271,48	212,71	49,07	218,29
CP_98	2	435,54	315,78	84,68	326,93
CP_98	3	568,36	399,35	119,10	416,73
CP_98	4	670,90	468,66	142,17	489,75
CP_98	5	748,04	520,56	168,24	547,07
CP_98	6	813,48	559,84	195,35	592,95
CP_98	7	856,44	587,75	223,22	628,71
CP_99	1	261,72	204,57	46,02	209,69
CP_99	2	414,06	313,81	86,38	325,48
CP_99	3	551,76	396,43	121,51	414,64
CP_99	4	657,22	468,35	146,48	490,72
CP_99	5	743,16	522,13	175,15	550,72
CP_99	6	808,60	561,11	205,50	597,56
CP_99	7				
CP_100	1	269,54	231,46	51,25	237,06
CP_100	2	486,32	354,18	97,80	367,44
CP_100	3	621,10	443,62	134,08	463,44
CP_100	4	729,50	518,61	160,85	542,98
CP_100	5	815,42	574,60	190,71	605,42
CP_100	6	882,82	615,31	224,61	655,02
CP_100	7	931,64	643,65	261,45	694,72

Arq.	Passe	Fz_pico (N)	Fz_med (N)	Fxy (N)	FR (N)
CP_101	1	248,04	196,38	44,17	201,28
CP_101	2	430,66	315,87	94,31	329,65
CP_101	3	569,34	402,57	135,97	424,91
CP_101	4	673,82	475,21	175,38	506,54
CP_101	5	753,90	528,65	219,65	572,47
CP_101	6	829,10	568,88	268,87	629,22
CP_101	7	891,60	596,62	314,56	674,46
CP_102	1	305,66	233,70	52,08	239,44
CP_102	2	499,02	357,19	99,94	370,91
CP_102	3	630,86	445,94	138,18	466,86
CP_102	4	733,40	520,80	164,06	546,03
CP_102	5	818,36	573,17	192,74	604,70
CP_102	6	879,88	610,63	221,98	649,73
CP_102	7	930,66	638,17	249,38	685,16
CP_103	1	248,04	197,82	41,44	202,11
CP_103	2	422,86	317,35	89,03	329,61
CP_103	3	550,78	401,00	125,48	420,17
CP_103	4	656,26	476,46	149,53	499,37
CP_103	5	748,04	531,21	176,30	559,70
CP_103	6	820,32	569,06	206,27	605,29
CP_103	7	867,18	596,67	235,79	641,57
CP_104	1	262,70	201,92	43,74	206,60
CP_104	2	426,76	315,65	87,84	327,65
CP_104	3	559,58	397,58	126,08	417,09
CP_104	4	665,04	470,52	150,71	494,07
CP_104	5	746,10	523,75	177,65	553,05
CP_104	6	811,52	560,86	205,93	597,47
CP_104	7	855,46	587,83	232,25	632,05
CP_105	1	303,72	242,13	59,13	249,24
CP_105	2	478,52	359,87	116,94	378,40
CP_105	3	621,10	444,38	171,67	476,39
CP_105	4	726,56	515,90	211,16	557,44
CP_105	5	834,96	574,63	254,19	628,34
CP_105	6	923,82	620,44	300,84	689,53
CP_105	7	981,44	647,01	338,37	730,15
CP_106	1	267,58	202,08	38,72	205,76
CP_106	2	434,58	315,92	85,45	327,27
CP_106	3	565,42	401,31	124,50	420,18
CP_106	4	669,92	477,13	153,46	501,20
CP_106	5	744,14	530,34	181,62	560,58
CP_106	6	810,54	568,41	211,52	606,49
CP_106	7	857,42	596,87	242,56	644,28

APÊNDICE C – METALOGRAFIA DOS CORPOS DE PROVAa) ASTM A653 CS-A – Chapa $t=0,43\text{mm}$ b) ASTM A653 CS-A – Chapa $t=0,80\text{mm}$

APÊNDICE D – DELINEAMENTO DO EXPERIMENTO 2⁵ (DOE)

Experimento Fatorial Completo

Fatores: 5 Experimento Base: 5; 32
 Ensaios: 106 Réplicas: 3
 Blocos: 1 Pts centrais (total): 10

Todos os termos estão livres de alias.

Tabela do Experimento

Ensaio	A	B	C	D	E
1	-	-	-	-	-
2	+	-	-	-	-
3	-	+	-	-	-
4	+	+	-	-	-
5	-	-	+	-	-
6	+	-	+	-	-
7	-	+	+	-	-
8	+	+	+	-	-
9	-	-	-	+	-
10	+	-	-	+	-
11	-	+	-	+	-
12	+	+	-	+	-
13	-	-	+	+	-
14	+	-	+	+	-
15	-	+	+	+	-
16	+	+	+	+	-
17	-	-	-	-	+
18	+	-	-	-	+
19	-	+	-	-	+
20	+	+	-	-	+
21	-	-	+	-	+
22	+	-	+	-	+
23	-	+	+	-	+
24	+	+	+	-	+
25	-	-	-	+	+
26	+	-	-	+	+
27	-	+	-	+	+
28	+	+	-	+	+
29	-	-	+	+	+
30	+	-	+	+	+
31	-	+	+	+	+
32	+	+	+	+	+
33	-	-	-	-	-
34	+	-	-	-	-
35	-	+	-	-	-
36	+	+	-	-	-
37	-	-	+	-	-
38	+	-	+	-	-
39	-	+	+	-	-
40	+	+	+	-	-
41	-	-	-	+	-
42	+	-	-	+	-
43	-	+	-	+	-
44	+	+	-	+	-
45	-	-	+	+	-
46	+	-	+	+	-
47	-	+	+	+	-
48	+	+	+	+	-
49	-	-	-	-	+
50	+	-	-	-	+
51	-	+	-	-	+
52	+	+	-	-	+
53	-	-	+	-	+

54	+	-	+	-	+
55	-	+	+	-	+
56	+	+	+	-	+
57	-	-	-	+	+
58	+	-	-	+	+
59	-	+	-	+	+
60	+	+	-	+	+
61	-	-	+	+	+
62	+	-	+	+	+
63	-	+	+	+	+
64	+	+	+	+	+
65	-	-	-	-	-
66	+	-	-	-	-
67	-	+	-	-	-
68	+	+	-	-	-
69	-	-	+	-	-
70	+	-	+	-	-
71	-	+	+	-	-
72	+	+	+	-	-
73	-	-	-	+	-
74	+	-	-	+	-
75	-	+	-	+	-
76	+	+	-	+	-
77	-	-	+	+	-
78	+	-	+	+	-
79	-	+	+	+	-
80	+	+	+	+	-
81	-	-	-	-	+
82	+	-	-	-	+
83	-	+	-	-	+
84	+	+	-	-	+
85	-	-	+	-	+
86	+	-	+	-	+
87	-	+	+	-	+
88	+	+	+	-	+
89	-	-	-	+	+
90	+	-	-	+	+
91	-	+	-	+	+
92	+	+	-	+	+
93	-	-	+	+	+
94	+	-	+	+	+
95	-	+	+	+	+
96	+	+	+	+	+
97	0	0	0	0	0
98	0	0	0	0	0
99	0	0	0	0	0
100	0	0	0	0	0
101	0	0	0	0	0
102	0	0	0	0	0
103	0	0	0	0	0
104	0	0	0	0	0
105	0	0	0	0	0
106	0	0	0	0	0

Regressão Fatorial: Fz_pico P7 versus dt; alfa; t; dz; f; PtCentral

* NOTA * Este experimento tem alguns ensaios danificados.

* NOTA * Este experimento não é ortogonal.

Método

Linhas não usadas 4

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	32	17319391	541231	917,19	0,000

Linear	5	16607440	3321488	5628,70	0,000
dt	1	383610	383610	650,08	0,000
alfa	1	279896	279896	474,32	0,000
t	1	11791018	11791018	19981,44	0,000
dz	1	3694644	3694644	6261,06	0,000
f	1	128	128	0,22	0,643
Interações de 2 fatores	10	597485	59749	101,25	0,000
dt*alfa	1	423	423	0,72	0,400
dt*t	1	18337	18337	31,07	0,000
dt*dz	1	70619	70619	119,67	0,000
dt*f	1	1804	1804	3,06	0,085
alfa*t	1	37693	37693	63,88	0,000
alfa*dz	1	38605	38605	65,42	0,000
alfa*f	1	318	318	0,54	0,466
t*dz	1	410352	410352	695,40	0,000
t*f	1	294	294	0,50	0,483
dz*f	1	64	64	0,11	0,743
Interações de 3 fatores	10	9446	945	1,60	0,125
dt*alfa*t	1	384	384	0,65	0,423
dt*alfa*dz	1	551	551	0,93	0,337
dt*alfa*f	1	113	113	0,19	0,664
dt*t*dz	1	3062	3062	5,19	0,026
dt*t*f	1	55	55	0,09	0,761
dt*dz*f	1	2204	2204	3,74	0,057
alfa*t*dz	1	1363	1363	2,31	0,133
alfa*t*f	1	1364	1364	2,31	0,133
alfa*dz*f	1	43	43	0,07	0,789
t*dz*f	1	225	225	0,38	0,539
Interações de 4 fatores	5	2197	439	0,74	0,593
dt*alfa*t*dz	1	1279	1279	2,17	0,145
dt*alfa*t*f	1	7	7	0,01	0,914
dt*alfa*dz*f	1	78	78	0,13	0,716
dt*t*dz*f	1	41	41	0,07	0,792
alfa*t*dz*f	1	815	815	1,38	0,244
Interações de 5 fatores	1	265	265	0,45	0,505
dt*alfa*t*dz*f	1	265	265	0,45	0,505
Curvatura	1	1438	1438	2,44	0,123
Erro	69	40717	590		
Total	101	17360108			

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
24,2919	99,77%	99,66%	99,56%

Coeficientes Codificados

Termo	Efeito	Coef	EP de			VIF
			Coef	Valor-T	Valor-P	
Constante		832,99	2,54	328,37	0,000	
dt	129,36	64,68	2,54	25,50	0,000	1,02
alfa	110,49	55,25	2,54	21,78	0,000	1,01
t	717,16	358,58	2,54	141,36	0,000	1,02
dz	401,45	200,72	2,54	79,13	0,000	1,01
f	2,36	1,18	2,54	0,47	0,643	1,01
dt*alfa	4,29	2,15	2,54	0,85	0,400	1,01
dt*t	28,28	14,14	2,54	5,57	0,000	1,01
dt*dz	55,50	27,75	2,54	10,94	0,000	1,01
dt*f	8,87	4,44	2,54	1,75	0,085	1,01
alfa*t	40,55	20,27	2,54	7,99	0,000	1,01
alfa*dz	41,04	20,52	2,54	8,09	0,000	1,01
alfa*f	3,72	1,86	2,54	0,73	0,466	1,01
t*dz	133,79	66,89	2,54	26,37	0,000	1,01
t*f	3,58	1,79	2,54	0,71	0,483	1,01
dz*f	-1,67	-0,83	2,54	-0,33	0,743	1,01
dt*alfa*t	4,09	2,05	2,54	0,81	0,423	1,01
dt*alfa*dz	4,90	2,45	2,54	0,97	0,337	1,01
dt*alfa*f	-2,22	-1,11	2,54	-0,44	0,664	1,01

dt*t*dz	11,56	5,78	2,54	2,28	0,026	1,01
dt*t*f	-1,55	-0,77	2,54	-0,30	0,761	1,01
dt*dz*f	9,81	4,90	2,54	1,93	0,057	1,01
alfa*t*dz	7,71	3,85	2,54	1,52	0,133	1,01
alfa*t*f	-7,71	-3,86	2,54	-1,52	0,133	1,01
alfa*dz*f	-1,36	-0,68	2,54	-0,27	0,789	1,01
t*dz*f	3,14	1,57	2,54	0,62	0,539	1,01
dt*alfa*t*dz	7,47	3,74	2,54	1,47	0,145	1,01
dt*alfa*t*f	-0,55	-0,27	2,54	-0,11	0,914	1,01
dt*alfa*dz*f	-1,85	-0,93	2,54	-0,36	0,716	1,01
dt*t*dz*f	1,34	0,67	2,54	0,26	0,792	1,01
alfa*t*dz*f	-5,96	-2,98	2,54	-1,18	0,244	1,01
dt*alfa*t*dz*f	3,40	1,70	2,54	0,67	0,505	1,01
Pt Ct		13,33	8,54	1,56	0,123	1,01

Equação de Regressão em Unidades Não codificadas

Fz_pico P7 = -3076 + 371 dt + 53,9 alfa + 4639 t + 5650 dz + 20,2 f - 7,4 dt*alfa - 454 dt*t - 635 dt*dz - 2,63 dt*f - 81 alfa*t - 107 alfa*dz - 0,390 alfa*f - 6732 t*dz - 28,7 t*f - 41,2 dz*f + 10,2 dt*alfa*t + 12,0 dt*alfa*dz + 0,0521 dt*alfa*f + 754 dt*t*dz + 3,47 dt*t*f + 4,74 dt*dz*f + 162 alfa*t*dz + 0,613 alfa*t*f + 0,754 alfa*dz*f + 54,5 t*dz*f - 14,7 dt*alfa*t*dz - 0,077 dt*alfa*t*f - 0,088 dt*alfa*dz*f - 5,64 dt*t*dz*f - 1,12 alfa*t*dz*f + 0,122 dt*alfa*t*dz*f + 58,72 Pt Ct

Estrutura de Aliases

Fator Nome

A	dt
B	alfa
C	t
D	dz
E	f

Aliases

I
A
B
C
D
E
AB
AC
AD
AE
BC
BD
BE
CD
CE
DE
ABC
ABD
ABE
ACD
ACE
ADE
BCD
BCE
BDE
CDE
ABCD
ABCE
ABDE
ACDE
BCDE
ABCDE

Ajustados e Diagnósticos para Observações Atípicas

Obs.	Fz_pico P7	Ajuste	Resíd	Resíd Pad	
25	370,1	459,0	-88,9	-4,48	R
57	508,8	459,0	49,8	2,51	R
105	981,4	891,7	89,7	3,92	R

R Resíduo grande

Estatísticas Descritivas: RESÍ1

Variável	N	N*	Média	EP	Média	DesvPad	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
RESÍ1	102	4	-0,00		1,99	20,08	-88,86	-7,00	-0,82	7,25	89,73

Gráfico de Probabilidade de RESÍ1**Regressão Fatorial: Fz_pico P7 versus dt; alfa; t; dz; f; PtCentral**

* NOTA * Este experimento tem alguns ensaios danificados.

* NOTA * Este experimento não é ortogonal.

Método

Linhas não usadas 7

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	32	16989341	530917	1773,63	0,000
Linear	5	16157587	3231517	10795,50	0,000
dt	1	348464	348464	1164,11	0,000
alfa	1	252585	252585	843,81	0,000
t	1	11051113	11051113	36918,34	0,000
dz	1	3529027	3529027	11789,38	0,000
f	1	499	499	1,67	0,201
Interações de 2 fatores	10	555281	55528	185,50	0,000
dt*alfa	1	981	981	3,28	0,075
dt*t	1	20420	20420	68,22	0,000
dt*dz	1	60907	60907	203,47	0,000
dt*f	1	894	894	2,99	0,089
alfa*t	1	39981	39981	133,56	0,000
alfa*dz	1	32225	32225	107,65	0,000
alfa*f	1	36	36	0,12	0,732
t*dz	1	373231	373231	1246,85	0,000
t*f	1	28	28	0,09	0,761
dz*f	1	13	13	0,04	0,836
Interações de 3 fatores	10	10123	1012	3,38	0,001
dt*alfa*t	1	59	59	0,20	0,659
dt*alfa*dz	1	1167	1167	3,90	0,053
dt*alfa*f	1	1	1	0,00	0,952
dt*t*dz	1	4239	4239	14,16	0,000
dt*t*f	1	17	17	0,06	0,811
dt*dz*f	1	1173	1173	3,92	0,052
alfa*t*dz	1	2229	2229	7,45	0,008
alfa*t*f	1	601	601	2,01	0,161
alfa*dz*f	1	313	313	1,05	0,310
t*dz*f	1	10	10	0,03	0,852
Interações de 4 fatores	5	1360	272	0,91	0,481
dt*alfa*t*dz	1	547	547	1,83	0,181
dt*alfa*t*f	1	193	193	0,65	0,424
dt*alfa*dz*f	1	8	8	0,03	0,874
dt*t*dz*f	1	310	310	1,03	0,313

alfa*t*dz*f	1	268	268	0,90	0,347
Interações de 5 fatores	1	20	20	0,07	0,798
dt*alfa*t*dz*f	1	20	20	0,07	0,798
Curvatura	1	5	5	0,02	0,902
Erro	66	19756	299		
Total	98	17009098			

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
17,3014	99,88%	99,83%	*

Coeficientes Codificados

Termo	Efeito	EP de				VIF
		Coef	Coef	Valor-T	Valor-P	
Constante		834,21	1,86	448,53	0,000	
dt	126,91	63,46	1,86	34,12	0,000	1,06
alfa	108,05	54,03	1,86	29,05	0,000	1,05
t	714,72	357,36	1,86	192,14	0,000	1,05
dz	403,89	201,94	1,86	108,58	0,000	1,05
f	4,80	2,40	1,86	1,29	0,201	1,05
dt*alfa	6,73	3,37	1,86	1,81	0,075	1,05
dt*t	30,72	15,36	1,86	8,26	0,000	1,05
dt*dz	53,06	26,53	1,86	14,26	0,000	1,05
dt*f	6,43	3,21	1,86	1,73	0,089	1,05
alfa*t	42,99	21,49	1,86	11,56	0,000	1,05
alfa*dz	38,59	19,30	1,86	10,38	0,000	1,05
alfa*f	1,28	0,64	1,86	0,34	0,732	1,05
t*dz	131,35	65,67	1,86	35,31	0,000	1,05
t*f	1,14	0,57	1,86	0,31	0,761	1,05
dz*f	0,77	0,39	1,86	0,21	0,836	1,05
dt*alfa*t	1,65	0,82	1,86	0,44	0,659	1,05
dt*alfa*dz	7,34	3,67	1,86	1,97	0,053	1,05
dt*alfa*f	0,22	0,11	1,86	0,06	0,952	1,05
dt*t*dz	14,00	7,00	1,86	3,76	0,000	1,05
dt*t*f	0,89	0,45	1,86	0,24	0,811	1,05
dt*dz*f	7,36	3,68	1,86	1,98	0,052	1,05
alfa*t*dz	10,15	5,08	1,86	2,73	0,008	1,05
alfa*t*f	-5,27	-2,64	1,86	-1,42	0,161	1,05
alfa*dz*f	-3,80	-1,90	1,86	-1,02	0,310	1,05
t*dz*f	0,69	0,35	1,86	0,19	0,852	1,05
dt*alfa*t*dz	5,03	2,51	1,86	1,35	0,181	1,05
dt*alfa*t*f	-2,99	-1,50	1,86	-0,80	0,424	1,05
dt*alfa*dz*f	0,59	0,30	1,86	0,16	0,874	1,05
dt*t*dz*f	3,78	1,89	1,86	1,02	0,313	1,05
alfa*t*dz*f	-3,52	-1,76	1,86	-0,95	0,347	1,05
dt*alfa*t*dz*f	0,96	0,48	1,86	0,26	0,798	1,05
Pt Ct		0,80	6,43	0,12	0,902	1,02

Equação de Regressão em Unidades Não codificadas

$$\begin{aligned}
 Fz_pico P7 = & -1050 + 117 dt + 20,1 alfa + 2105 t + 583 dz + 6,7 f - 3,20 dt*alfa - 137 dt*t \\
 & - 1 dt*dz - 0,94 dt*f - 38,9 alfa*t - 22 alfa*dz - 0,165 alfa*f - 398 t*dz \\
 & - 11,8 t*f - 7,5 dz*f + 5,0 dt*alfa*t + 1,5 dt*alfa*dz + 0,0239 dt*alfa*f \\
 & - 37 dt*t*dz + 1,36 dt*t*f + 0,52 dt*dz*f + 57 alfa*t*dz + 0,332 alfa*t*f \\
 & + 0,191 alfa*dz*f + 12,2 t*dz*f - 1,5 dt*alfa*t*dz - 0,0422 dt*alfa*t*f \\
 & - 0,0173 dt*alfa*dz*f - 0,36 dt*t*dz*f - 0,414 alfa*t*dz*f \\
 & + 0,034 dt*alfa*t*dz*f + 46,28 Pt Ct
 \end{aligned}$$

Estrutura de Aliases

Fator	Nome
A	dt
B	alfa
C	t
D	dz

E f

Aliases

I
A
B
C
D
E
AB
AC
AD
AE
BC
BD
BE
CD
CE
DE
ABC
ABD
ABE
ACD
ACE
ADE
BCD
BCE
BDE
CDE
ABCD
ABCE
ABDE
ACDE
BCDE
ABCDE

Ajustados e Diagnósticos para Observações Atípicas

Obs.	Fz_pico P7	Ajuste	Resíd	Resíd Pad	
15	1418,0	1446,9	-29,0	-2,05	R
28	777,3	742,2	35,2	2,49	R
47	1480,5	1446,9	33,5	2,37	R
89	498,0	498,0	-0,0	*	X
94	1508,8	1480,5	28,3	2,00	R
100	931,6	880,5	51,2	3,16	R
102	930,7	880,5	50,2	3,10	R

R Resíduo grande

X Atípicos X

Estatísticas Descritivas: RESÍ2

Variável	N	N*	Média	EP	Média	DesvPad	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
RESÍ2	99	7	0,00		1,43	14,20	-28,97	-6,84	-0,97	6,84	51,15

Gráfico de Probabilidade de RESÍ2

Regressão Fatorial: Fz_pico P7 versus dt; alfa; t; dz; f; PtCentral

* NOTA * Este experimento tem alguns ensaios danificados.

* NOTA * Este experimento não é ortogonal.

Método

Linhas não usadas 8

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	32	16984519	530766	2057,69	0,000
Linear	5	16157587	3231517	12528,01	0,000
dt	1	348464	348464	1350,93	0,000
alfa	1	252585	252585	979,23	0,000
t	1	11051113	11051113	42843,18	0,000
dz	1	3529027	3529027	13681,41	0,000
f	1	499	499	1,93	0,169
Interações de 2 fatores	10	555281	55528	215,27	0,000
dt*alfa	1	981	981	3,80	0,055
dt*t	1	20420	20420	79,16	0,000
dt*dz	1	60907	60907	236,12	0,000
dt*f	1	894	894	3,47	0,067
alfa*t	1	39981	39981	155,00	0,000
alfa*dz	1	32225	32225	124,93	0,000
alfa*f	1	36	36	0,14	0,712
t*dz	1	373231	373231	1446,95	0,000
t*f	1	28	28	0,11	0,743
dz*f	1	13	13	0,05	0,823
Interações de 3 fatores	10	10123	1012	3,92	0,000
dt*alfa*t	1	59	59	0,23	0,634
dt*alfa*dz	1	1167	1167	4,52	0,037
dt*alfa*f	1	1	1	0,00	0,948
dt*t*dz	1	4239	4239	16,43	0,000
dt*t*f	1	17	17	0,07	0,796
dt*dz*f	1	1173	1173	4,55	0,037
alfa*t*dz	1	2229	2229	8,64	0,005
alfa*t*f	1	601	601	2,33	0,132
alfa*dz*f	1	313	313	1,21	0,275
t*dz*f	1	10	10	0,04	0,841
Interações de 4 fatores	5	1360	272	1,05	0,394
dt*alfa*t*dz	1	547	547	2,12	0,150
dt*alfa*t*f	1	193	193	0,75	0,390
dt*alfa*dz*f	1	8	8	0,03	0,865
dt*t*dz*f	1	310	310	1,20	0,277
alfa*t*dz*f	1	268	268	1,04	0,312
Interações de 5 fatores	1	20	20	0,08	0,783
dt*alfa*t*dz*f	1	20	20	0,08	0,783
Curvatura	1	272	272	1,05	0,309
Erro	65	16766	258		
Total	97	17001285			

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
16,0606	99,90%	99,85%	*

Coeficientes Codificados

Termo	Efeito	EP de		Valor-T	Valor-P	VIF
		Coef	Coef			
Constante		834,21	1,73	483,18	0,000	
dt	126,91	63,46	1,73	36,76	0,000	1,06
alfa	108,05	54,03	1,73	31,29	0,000	1,05
t	714,72	357,36	1,73	206,99	0,000	1,05
dz	403,89	201,94	1,73	116,97	0,000	1,05
f	4,80	2,40	1,73	1,39	0,169	1,05
dt*alfa	6,73	3,37	1,73	1,95	0,055	1,05
dt*t	30,72	15,36	1,73	8,90	0,000	1,05
dt*dz	53,06	26,53	1,73	15,37	0,000	1,05
dt*f	6,43	3,21	1,73	1,86	0,067	1,05

alfa*t	42,99	21,49	1,73	12,45	0,000	1,05
alfa*dz	38,59	19,30	1,73	11,18	0,000	1,05
alfa*f	1,28	0,64	1,73	0,37	0,712	1,05
t*dz	131,35	65,67	1,73	38,04	0,000	1,05
t*f	1,14	0,57	1,73	0,33	0,743	1,05
dz*f	0,77	0,39	1,73	0,22	0,823	1,05
dt*alfa*t	1,65	0,82	1,73	0,48	0,634	1,05
dt*alfa*dz	7,34	3,67	1,73	2,13	0,037	1,05
dt*alfa*f	0,22	0,11	1,73	0,06	0,948	1,05
dt*t*dz	14,00	7,00	1,73	4,05	0,000	1,05
dt*t*f	0,89	0,45	1,73	0,26	0,796	1,05
dt*dz*f	7,36	3,68	1,73	2,13	0,037	1,05
alfa*t*dz	10,15	5,08	1,73	2,94	0,005	1,05
alfa*t*f	-5,27	-2,64	1,73	-1,53	0,132	1,05
alfa*dz*f	-3,80	-1,90	1,73	-1,10	0,275	1,05
t*dz*f	0,69	0,35	1,73	0,20	0,841	1,05
dt*alfa*t*dz	5,03	2,51	1,73	1,46	0,150	1,05
dt*alfa*t*f	-2,99	-1,50	1,73	-0,87	0,390	1,05
dt*alfa*dz*f	0,59	0,30	1,73	0,17	0,865	1,05
dt*t*dz*f	3,78	1,89	1,73	1,10	0,277	1,05
alfa*t*dz*f	-3,52	-1,76	1,73	-1,02	0,312	1,05
dt*alfa*t*dz*f	0,96	0,48	1,73	0,28	0,783	1,05
Pt Ct		-6,51	6,35	-1,03	0,309	1,01

Equação de Regressão em Unidades Não codificadas

$$\begin{aligned}
 Fz_pico\ P7 = & -1050 + 117\ dt + 20,1\ alfa + 2105\ t + 583\ dz + 6,7\ f - 3,20\ dt*alfa - 137\ dt*t \\
 & - 1\ dt*dz - 0,94\ dt*f - 38,9\ alfa*t - 22,1\ alfa*dz - 0,165\ alfa*f - 398\ t*dz \\
 & - 11,8\ t*f - 7,5\ dz*f + 5,0\ dt*alfa*t + 1,5\ dt*alfa*dz + 0,0239\ dt*alfa*f \\
 & - 37\ dt*t*dz + 1,36\ dt*t*f + 0,52\ dt*dz*f + 57\ alfa*t*dz + 0,332\ alfa*t*f \\
 & + 0,191\ alfa*dz*f + 12,2\ t*dz*f - 1,5\ dt*alfa*t*dz - 0,0422\ dt*alfa*t*f \\
 & - 0,0173\ dt*alfa*dz*f - 0,36\ dt*t*dz*f - 0,414\ alfa*t*dz*f \\
 & + 0,034\ dt*alfa*t*dz*f + 38,98\ Pt\ Ct
 \end{aligned}$$

Estrutura de Aliases

Fator Nome

A dt
 B alfa
 C t
 D dz
 E f

Aliases

I
 A
 B
 C
 D
 E
 AB
 AC
 AD
 AE
 BC
 BD
 BE
 CD
 CE
 DE
 ABC
 ABD
 ABE
 ACD
 ACE
 ADE

BCD
 BCE
 BDE
 CDE
 ABCD
 ABCE
 ABDE
 ACDE
 BCDE
 ABCDE

Ajustados e Diagnósticos para Observações Atípicas

Obs.	Fz_pico	P7	Ajuste	Resíd	Resíd Pad	
15	1418,0		1446,9	-29,0	-2,21	R
20	369,1		396,8	-27,7	-2,11	R
28	777,3		742,2	35,2	2,68	R
47	1480,5		1446,9	33,5	2,56	R
89	498,0		498,0	-0,0	*	X
94	1508,8		1480,5	28,3	2,16	R
102	930,7		873,2	57,5	3,87	R

R Resíduo grande

X Atípicos X

Estatísticas Descritivas: RESÍ3

Variável	N	N*	Média	EP	Média	DesvPad	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
RESÍ3	98	8	-0,00		1,33	13,15	-28,97	-6,35	-0,98	6,83	57,48

Gráfico de Probabilidade de RESÍ3

Regressão Fatorial: Fz_pico P7 versus dt; alfa; t; dz; f; PtCentral

* NOTA * Este experimento tem alguns ensaios danificados.

* NOTA * Este experimento não é ortogonal.

Método

Linhas não usadas 9

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	32	16980575	530643	2630,18	0,000
Linear	5	16157587	3231517	16017,32	0,000
dt	1	348464	348464	1727,19	0,000
alfa	1	252585	252585	1251,96	0,000
t	1	11051113	11051113	54775,88	0,000
dz	1	3529027	3529027	17491,96	0,000
f	1	499	499	2,47	0,121
Interações de 2 fatores	10	555281	55528	275,23	0,000
dt*alfa	1	981	981	4,86	0,031
dt*t	1	20420	20420	101,21	0,000
dt*dz	1	60907	60907	301,89	0,000
dt*f	1	894	894	4,43	0,039
alfa*t	1	39981	39981	198,17	0,000
alfa*dz	1	32225	32225	159,73	0,000
alfa*f	1	36	36	0,18	0,676
t*dz	1	373231	373231	1849,96	0,000
t*f	1	28	28	0,14	0,711

dz*f	1	13	13	0,06	0,801
Interações de 3 fatores	10	10123	1012	5,02	0,000
dt*alfa*t	1	59	59	0,29	0,591
dt*alfa*dz	1	1167	1167	5,78	0,019
dt*alfa*f	1	1	1	0,01	0,942
dt*t*dz	1	4239	4239	21,01	0,000
dt*t*f	1	17	17	0,09	0,770
dt*dz*f	1	1173	1173	5,82	0,019
alfa*t*dz	1	2229	2229	11,05	0,001
alfa*t*f	1	601	601	2,98	0,089
alfa*dz*f	1	313	313	1,55	0,217
t*dz*f	1	10	10	0,05	0,821
Interações de 4 fatores	5	1360	272	1,35	0,256
dt*alfa*t*dz	1	547	547	2,71	0,104
dt*alfa*t*f	1	193	193	0,96	0,331
dt*alfa*dz*f	1	8	8	0,04	0,847
dt*t*dz*f	1	310	310	1,53	0,220
alfa*t*dz*f	1	268	268	1,33	0,253
Interações de 5 fatores	1	20	20	0,10	0,755
dt*alfa*t*dz*f	1	20	20	0,10	0,755
Curvatura	1	1439	1439	7,13	0,010
Erro	64	12912	202		
Total	96	16993487			

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
14,2039	99,92%	99,89%	*

Coeficientes Codificados

Termo	Efeito	EP de		Valor-T	Valor-P	VIF
		Coef	Coef			
Constante		834,21	1,53	546,34	0,000	
dt	126,91	63,46	1,53	41,56	0,000	1,06
alfa	108,05	54,03	1,53	35,38	0,000	1,05
t	714,72	357,36	1,53	234,04	0,000	1,05
dz	403,89	201,94	1,53	132,26	0,000	1,05
f	4,80	2,40	1,53	1,57	0,121	1,05
dt*alfa	6,73	3,37	1,53	2,21	0,031	1,05
dt*t	30,72	15,36	1,53	10,06	0,000	1,05
dt*dz	53,06	26,53	1,53	17,37	0,000	1,05
dt*f	6,43	3,21	1,53	2,11	0,039	1,05
alfa*t	42,99	21,49	1,53	14,08	0,000	1,05
alfa*dz	38,59	19,30	1,53	12,64	0,000	1,05
alfa*f	1,28	0,64	1,53	0,42	0,676	1,05
t*dz	131,35	65,67	1,53	43,01	0,000	1,05
t*f	1,14	0,57	1,53	0,37	0,711	1,05
dz*f	0,77	0,39	1,53	0,25	0,801	1,05
dt*alfa*t	1,65	0,82	1,53	0,54	0,591	1,05
dt*alfa*dz	7,34	3,67	1,53	2,41	0,019	1,05
dt*alfa*f	0,22	0,11	1,53	0,07	0,942	1,05
dt*t*dz	14,00	7,00	1,53	4,58	0,000	1,05
dt*t*f	0,89	0,45	1,53	0,29	0,770	1,05
dt*dz*f	7,36	3,68	1,53	2,41	0,019	1,05
alfa*t*dz	10,15	5,08	1,53	3,32	0,001	1,05
alfa*t*f	-5,27	-2,64	1,53	-1,73	0,089	1,05
alfa*dz*f	-3,80	-1,90	1,53	-1,25	0,217	1,05
t*dz*f	0,69	0,35	1,53	0,23	0,821	1,05
dt*alfa*t*dz	5,03	2,51	1,53	1,65	0,104	1,05
dt*alfa*t*f	-2,99	-1,50	1,53	-0,98	0,331	1,05
dt*alfa*dz*f	0,59	0,30	1,53	0,19	0,847	1,05
dt*t*dz*f	3,78	1,89	1,53	1,24	0,220	1,05
alfa*t*dz*f	-3,52	-1,76	1,53	-1,15	0,253	1,05
dt*alfa*t*dz*f	0,96	0,48	1,53	0,31	0,755	1,05
Pt Ct		-16,09	6,02	-2,67	0,010	1,01

Equação de Regressão em Unidades Não codificadas

Fz_pico P7 = -1050 + 117 dt + 20,1 alfa + 2105 t + 583 dz + 6,7 f - 3,20 dt*alfa - 137 dt*t
 - 1 dt*dz - 0,94 dt*f - 38,9 alfa*t - 22,1 alfa*dz - 0,165 alfa*f - 398 t*dz
 - 11,8 t*f - 7,5 dz*f + 5,0 dt*alfa*t + 1,5 dt*alfa*dz + 0,0239 dt*alfa*f
 - 37 dt*t*dz + 1,36 dt*t*f + 0,52 dt*dz*f + 57 alfa*t*dz + 0,332 alfa*t*f
 + 0,191 alfa*dz*f + 12,2 t*dz*f - 1,5 dt*alfa*t*dz - 0,0422 dt*alfa*t*f
 - 0,0173 dt*alfa*dz*f - 0,36 dt*t*dz*f - 0,414 alfa*t*dz*f
 + 0,034 dt*alfa*t*dz*f + 29,40 Pt Ct

Estrutura de Aliases

Fator Nome

A dt
 B alfa
 C t
 D dz
 E f

Aliases

I
 A
 B
 C
 D
 E
 AB
 AC
 AD
 AE
 BC
 BD
 BE
 CD
 CE
 DE
 ABC
 ABD
 ABE
 ACD
 ACE
 ADE
 BCD
 BCE
 BDE
 CDE
 ABCD
 ABCE
 ABDE
 ACDE
 BCDE
 ABCDE

Ajustados e Diagnósticos para Observações Atípicas

Obs.	Fz_pico P7	Ajuste	Resíd	Resíd Pad	
15	1418,0	1446,9	-29,0	-2,50	R
20	369,1	396,8	-27,7	-2,39	R
28	777,3	742,2	35,2	3,03	R
47	1480,5	1446,9	33,5	2,89	R
88	992,2	1018,2	-26,0	-2,25	R
89	498,0	498,0	0,0	*	X
94	1508,8	1480,5	28,3	2,44	R
101	891,6	863,6	28,0	2,16	R

R Resíduo grande
 X Atípicos X

Estatísticas Descritivas: RESÍ4

Variável	N	N*	Média	EP	Média	DesvPad	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
RESÍ4	97	9	-0,00		1,18	11,60	-28,97	-6,19	-0,97	6,67	35,15

Gráfico de Probabilidade de RESÍ4

APÊNDICE E – DELINEAMENTO DO EXPERIMENTO 2² (DOE) – h_{máx}

Experimento Fatorial Completo

Fatores: 2 Experimento Base: 2; 4
 Ensaios: 17 Réplicas: 3
 Blocos: 1 Pts centrais (total): 5

Todos os termos estão livres de alias.

Tabela do Experimento

Ensaio	A	B
1	-	-
2	+	-
3	-	+
4	+	+
5	-	-
6	+	-
7	-	+
8	+	+
9	-	-
10	+	-
11	-	+
12	+	+
13	0	0
14	0	0
15	0	0
16	0	0
17	0	0

Regressão Fatorial: h_{máx} versus dt; dz; PtCentral

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	4	235,375	58,844	259,81	0,000
Linear	2	233,264	116,632	514,95	0,000
dt	1	2,262	2,262	9,99	0,008
dz	1	231,002	231,002	1019,92	0,000
Interações de 2 fatores	1	0,216	0,216	0,95	0,348
dt*dz	1	0,216	0,216	0,95	0,348
Curvatura	1	1,895	1,895	8,37	0,014
Erro	12	2,718	0,226		
Total	16	238,093			

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
0,475910	98,86%	98,48%	97,94%

Coefficientes Codificados

Termo	Efeito	Coef	EP de		Valor-P	VIF
			Coef	Valor-T		
Constante		12,711	0,137	92,52	0,000	
dt	0,868	0,434	0,137	3,16	0,008	1,00
dz	-8,775	-4,387	0,137	-31,94	0,000	1,00
dt*dz	-0,268	-0,134	0,137	-0,98	0,348	1,00
Pt Ct		-0,733	0,253	-2,89	0,014	1,00

Equação de Regressão em Unidades Não codificadas

$$hm\acute{a}x = 22,25 + 0,558 dt - 19,03 dz - 0,447 dt*dz - 0,733 Pt Ct$$

Estrutura de Aliases

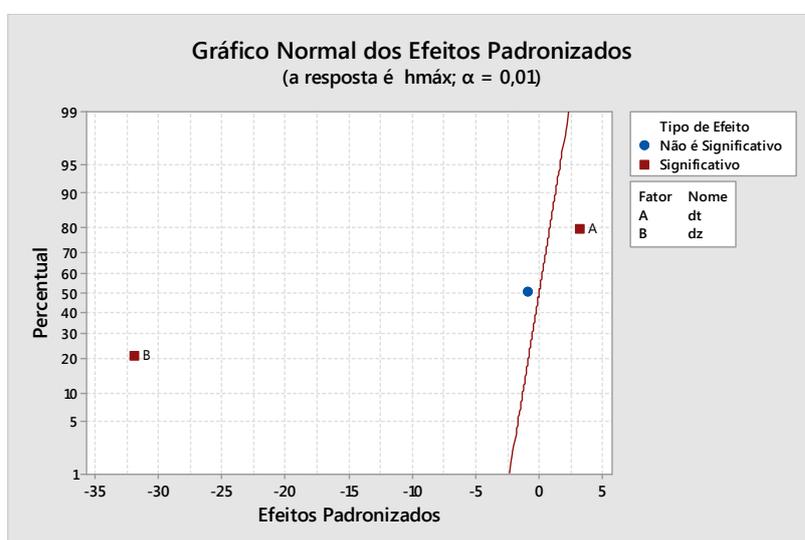
Fator Nome

A dt
B dz

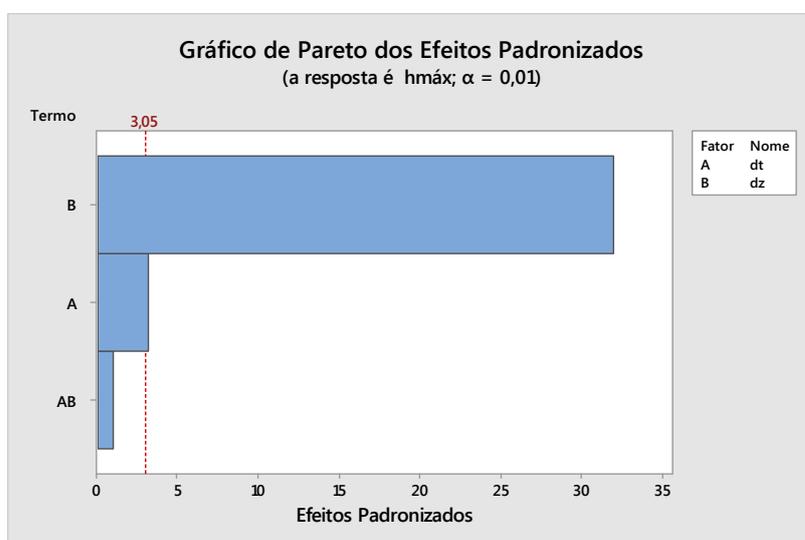
Aliases

I
A
B
AB

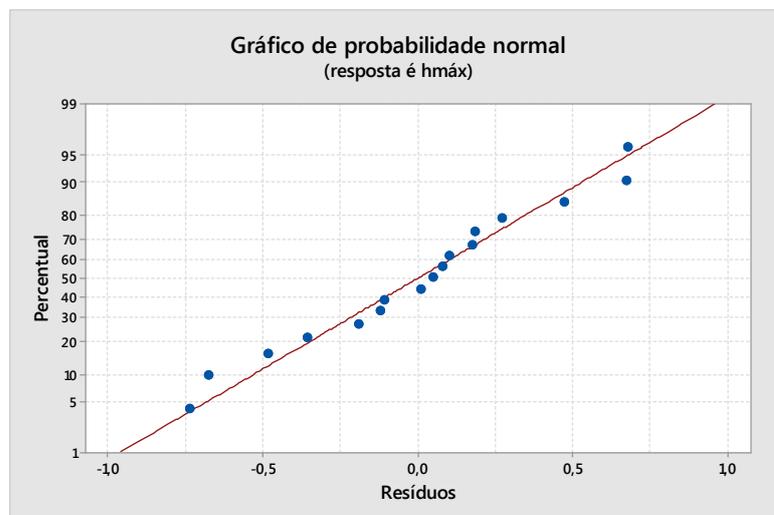
Gráfico de Efeitos para hmáx



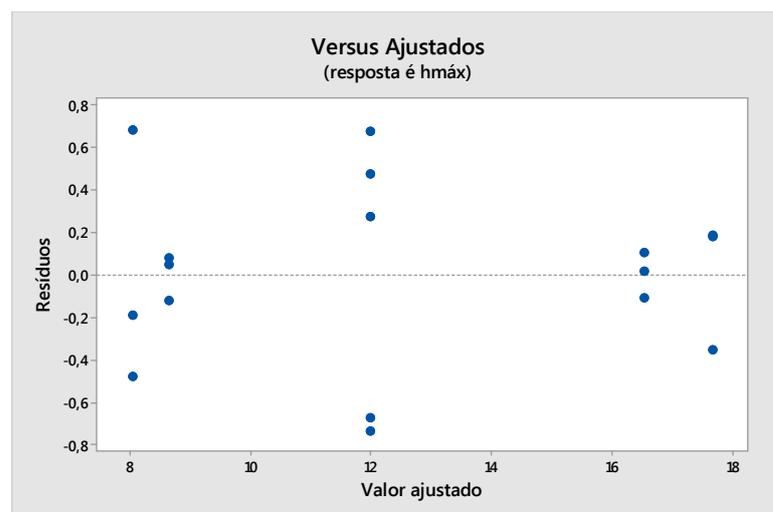
Efeitos de Pareto para hmáx



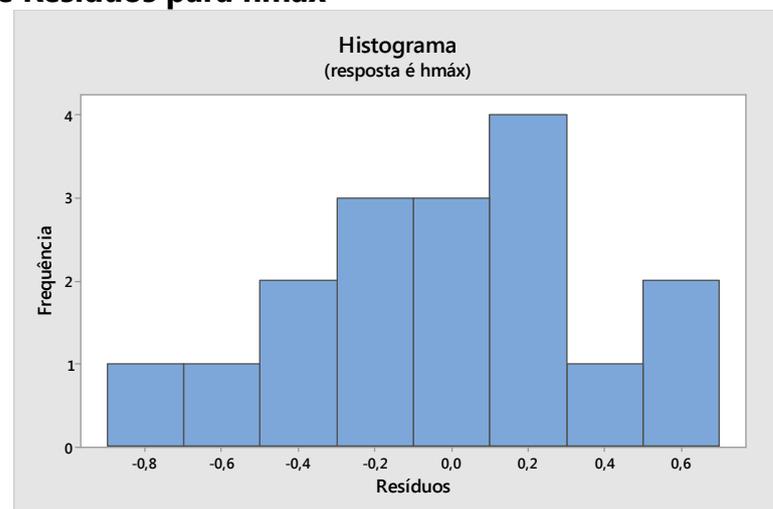
Normplot dos Resíduos para hmáx



Resíduos vs ajustados para hmáx



Histograma de Resíduos para hmáx



Resíduos vs Ordem para hmáx

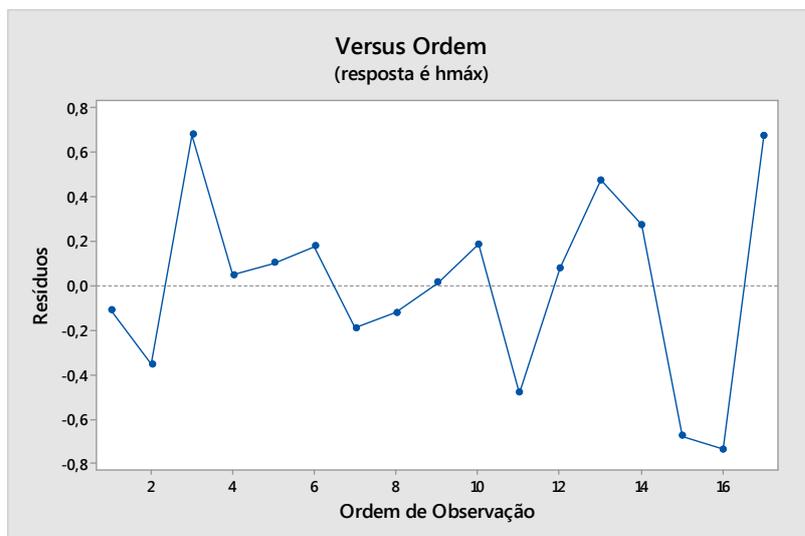
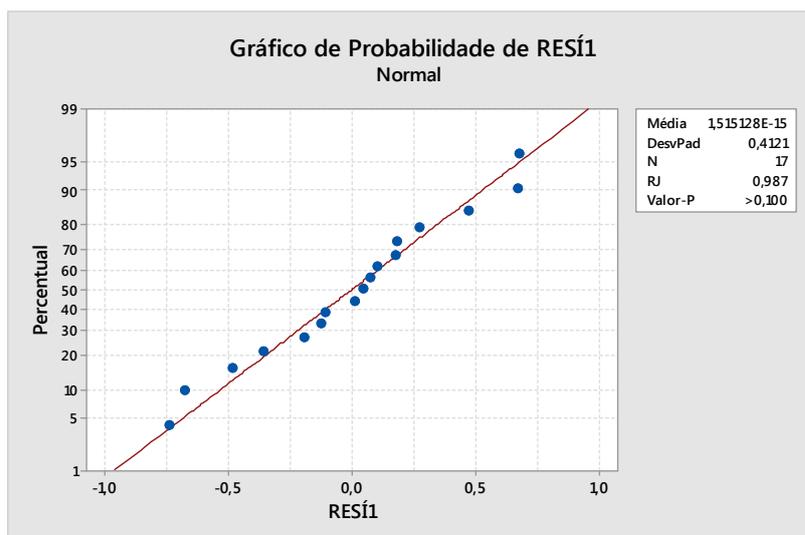


Gráfico de Probabilidade de RESÍ1



APÊNDICE F – PROPRIEDADES DO MATERIAL ENSAIADO

ANISOTROPIA aço ASTM A653 CS-A G90 Chapa 0,43mm

Direção de Laminação	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Média Amostral
0°	1,010	0,920	0,825	0,918
45°	0,933	0,901	0,894	0,909
90°	0,871	0,852	0,963	0,918

ANISOTROPIA aço ASTM A653 CS-A G90 Chapa 0,80mm

Direção de Laminação	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Média Amostral
0°	1,199	1,326	1,207	1,244
45°	0,955	0,858	0,981	0,931
90°	0,918	1,209	1,147	1,091

Propriedades Mecânicas do aço ASTM A653 CS-A G90

Amostras na Direção de Laminação	CS-A - #0,43mm			CS-A - #0,80mm		
	LE (MPa)	LR (MPa)	AI (%)*	LE (MPa)	LR (MPa)	AI (%)*
Amostra 3 – Direção 90°	224,887	236,964	46,538	202.596	238.029	52.068
Amostra 2 – Direção 90°	233,598	235,775	49,510	210.896	250.479	48.650
Amostra 1 – Direção 90°	222,709	236,319	45,255	194.616	233.880	52.110
Amostra 1 – Direção 45°	214,197	227,460	39,163	220.153	255.799	47.105
Amostra 2 – Direção 45°	212,483	231,351	44,413	226.644	261.226	50.478
Amostra 3 – Direção 45°	236,368	248,841	42,063	223.615	268.744	47.104
Amostra 3 – Direção 0°	197,172	229,440	44,613	226.218	244.520	41.245
Amostra 2 – Direção 0°	183,116	216,177	44,278	224.090	239.306	42.920
Amostra 1 – Direção 0°	187,868	219,146	43,990	241.860	260.268	43.360

*Alongamento A50

Propriedades da Lei de Potência do aço ASTM A653 CS-A G90

Amostras na Direção de Laminação	CS-A - #0,43mm		CS-A - #0,80mm	
	K	n	n	K
Amostra 1 – Direção 0°	499.151	0.25648	0.23054	454.6565
Amostra 2 – Direção 0°	482.084	0.26348	0.22449	413.9832
Amostra 3 – Direção 0°	443.946	0.25285	0.23456	430.102
Amostra 1 – Direção 45°			0.25585	461.5026
Amostra 2 – Direção 45°			0.25521	472.6352
Amostra 3 – Direção 45°			0.26664	475.7158
Amostra 1 – Direção 90°			0.29107	441.873
Amostra 2 – Direção 90°			0.25740	454.6296
Amostra 3 – Direção 90°			0.27957	446.1723

