

ÉD CLAUDIO BORDINASSI

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA INTEGRIDADE SUPERFICIAL DE
UM AÇO INOXIDÁVEL SUPER-DUPLEX APÓS USINAGEM**

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

São Paulo

2006

ÉD CLAUDIO BORDINASSI

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA INTEGRIDADE SUPERFICIAL DE
UM AÇO INOXIDÁVEL SUPER-DUPLEX APÓS USINAGEM**

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

Orientador: Prof. Dr. Marco Stipkovic Filho

Co-orientador: Prof. Dr. Gilmar Ferreira Batalha

Área de Concentração: Engenharia Mecânica

São Paulo

2006

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha esposa Marta,
fiel companheira das horas de lazer e de
trabalho, e à pequena Julia, que nascerá em
breve e já é motivo de grande felicidade.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Dr. Marco Stipkovic que além da orientação para a execução deste trabalho me privilegiou com sua amizade e companheirismo no dia-a-dia.

Agradeço também ao Prof. Dr. Gilmar Batalha pela co-orientação feita de maneira competente.

À Sulzer Pumps, em especial ao Prof. Dr. Marcelo Martins pelo fornecimento do material para usinagem.

Ao Prof. Dr. Sérgio Delijaicov pela grande ajuda durante todo o desenvolvimento deste trabalho.

À Sandvik Coromant, em especial ao Eng. Domenico e ao Sr. Arlindo Wandele pelo fornecimento das ferramentas e ajuda na execução de parte dos ensaios.

Ao Eng. Renato e ao Sr. Fábio da FAG rolamentos pela ajuda em parte dos ensaios.

Ao Prof. Dr. Nelson Batista, Renê e Amanda do IPEN pelas medições de tensão residual.

Aos técnicos Margarete e Daniel da Escola de Engenharia Mauá pela preparação das amostras metalográficas.

À Sra. Cleide e à Srta. Silvia da Escola de Engenharia Mauá pela incansável busca de minhas solicitações de referências bibliográficas.

Aos amigos Rubens, Nelson e Márcio da Escola de Engenharia Mauá pela grande ajuda na preparação de todo o trabalho.

Aos amigos Sérgio Moriguchi, Susana Lebrão, Amilton Ara e Márcio Lucato pelo constante incentivo, companheirismo e ajuda na elaboração desta tese, e aos amigos Luciano

de Sousa, Carlos Oscar, Fernando de Freitas e Ian Faccio (in memoriam) pelo companheirinho no estudo e grande ajuda no decorrer dos anos em que este trabalho foi feito.

Aos meus pais Claudio e Célia que sempre se esforçaram em dar o melhor de si à minha educação e acima de tudo me ajudaram não só na execução deste trabalho, mas ao longo de toda a minha vida.

A todos que contribuíram de alguma forma para o término deste trabalho e principalmente a Deus que me permitiu cumprir mais esta etapa.

*"Nunca ande pelo caminho traçado, pois ele
conduz somente até onde os outros foram."*

Alexandre Graham Bell

SUMÁRIO

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| LISTA DE FIGURAS | I |
| LISTA DE TABELAS | VI |
| LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS | VII |
| LISTA DE SÍMBOLOS | VIII |
| RESUMO | X |
| ABSTRACT | XI |
| | |
| 1. INTRODUÇÃO..... | 01 |
| | |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 03 |
| 2.1 - Aço inoxidável duplex (DSS – Duplex Stainless Steel) e super duplex (SDSS – Super Duplex Stainless Steel) | 03 |
| 2.1.1 - A história dos aços inoxidáveis duplex | 03 |
| 2.1.2 - Generalidades | 04 |
| 2.1.3 - Principais elementos de liga de um aço inoxidável..... | 08 |
| 2.1.4 - Estrutura de um aço inoxidável duplex | 10 |
| 2.2 - Usinagem de aço inoxidável | 14 |
| 2.2.1 - Generalidades | 14 |
| 2.3 - Esforços de corte..... | 16 |
| 2.4 - Tensão residual | 18 |
| 2.4.1 - Métodos para medições das tensões residuais..... | 21 |
| 2.4.1.1 -Método do $\text{sen}^2 \psi$ | 24 |

| | | |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3. | MATERIAIS E MÉTODOS..... | 29 |
| 3.1 - | Operações de desbaste | 30 |
| 3.1.1 - | Equipamentos e materiais utilizados | 30 |
| 3.1.2 - | Parâmetros utilizados e métodos | 35 |
| 3.1.2.1 - | Usinagem | 35 |
| 3.1.2.2 - | Amostras metalográficas..... | 38 |
| 3.2 - | Ensaio com “casca” | 39 |
| 3.3 - | Ensaio de acabamento | 41 |
| 3.3.1 - | Equipamentos utilizados..... | 41 |
| 3.3.2 - | Parâmetros utilizados e métodos..... | 52 |
| 4. | RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÕES..... | 56 |
| 4.1 | - Operações de desbaste | 56 |
| 4.1.1 | - Caracterização do processo de desbaste..... | 56 |
| 4.1.1.1 | - Observações e resultados gerais..... | 56 |
| 4.1.1.2 | - Análises fatoriais para a rugosidade | 58 |
| 4.1.1.3 | Análises das microestruturas | 63 |
| 4.1.2 | Ensaio de vida de ferramenta com desbaste do material com “casca” | 69 |
| 4.2 | Operações de acabamento | 79 |
| 4.2.1 | Respostas obtidas para a rugosidade superficial..... | 79 |
| 4.2.1.1 | Análises fatoriais para a rugosidade superficial..... | 81 |
| 4.2.2 | Respostas obtidas para as forças de usinagem..... | 85 |
| 4.2.2.1 | Análises fatoriais para as forças de usinagem..... | 87 |
| 4.2.3 | Respostas obtidas para a estabilidade dimensional | 95 |
| 4.2.4 | Respostas obtidas para a tensão residual | 101 |

| | | |
|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.2.4.1 | Análises fatoriais para a tensão residual | 102 |
| 4.2.5 | Respostas obtidas para as medições de micro-dureza | 117 |
| 4.2.5.1 | Análises fatoriais para os valores de micro-dureza | 121 |
| 4.2.6 - | Respostas obtidas para as análises microestruturais..... | 129 |
| 4.2.7 | Correlações entre os resultados | 131 |
| 4.2.8 | Gráficos de contorno das respostas x parâmetros de corte..... | 133 |
| 5. | CONCLUSÕES..... | 141 |
| 6. | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 144 |
| 7. | BIBLIOGRAFIA..... | 145 |
| 8. | ANEXO A: RESULTADOS DAS MICRO-DUREZAS..... | 152 |
| 9. | ANEXO B - CORRELAÇÕES ENTRE AS RESPOSTAS..... | 157 |
| 10. | ANEXO C - REGRESSÃO PARA MODELO DA TENSÃO RESIDUAL EM FUNÇÃO DOS PARÂMETROS DE CORTE E DA TENSÃO RESIDUAL EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DIMENSIONAL..... | 199 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Comparação dos custos acumulados na utilização de um aço ao carbono e um DSS em uma instalação offshore (STILL, 1994)..... | 08 |
| Figura 2 – Diagrama TTT do aço inoxidável super duplex SAF 2507 (NILSSON, 1992)..... | 13 |
| Figura 3 – Força de usinagem e suas componentes no processo de torneamento (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2001) | 17 |
| Figura 4 – Carregamento e descarregamento nas superfícies do metal quando da passagem na ponta da ferramenta (SHAW, 1915)..... | 20 |
| Figura 5 – Difração de raios-X em cristais simples carregados e descarregados (BRINKSMEIER, 1982)..... | 22 |
| Figura 6 – Estado plano de tensões (PREVÉY, 1996) | 25 |
| Figura 7 – Elipsóide de deformações (PREVÉY, 1996) | 25 |
| Figura 8 – Gráfico $2\theta - \sin^2 \psi$ | 27 |
| Figura 9 – Centro de Torneamento Romi Multiplic 35D | 30 |
| Figura 10 – Utilização do fluido de corte em abundância..... | 31 |
| Figura 11 – Ângulos das geometrias MM e MR [SANDVIK COROMANT, 2002b]..... | 32 |
| Figura 12 – Avanço e profundidade de corte recomendados para as geometrias MM, MR e MF [SANDVIK COROMANT, 2002b] | 32 |
| Figura 13 – Corpo de prova fundido | 34 |
| Figura 14 – Exemplo de um corpo de prova utilizado nos ensaios de desbaste..... | 37 |
| Figura 15 - Centro de torneamento OKUMA..... | 42 |
| Figura 16 – Ângulos da geometria MF [SANDVIK COROMANT, 2002b] | 43 |
| Figura 17 – Montagem do transdutor-suporte | 44 |
| Figura 18 – Equipamentos utilizados na aquisição dos sinais do dinamômetro | 46 |
| Figura 19 – Saída do fluido de corte..... | 47 |

Gracias por visitar este Libro Electrónico

Puedes leer la versión completa de este libro electrónico en diferentes formatos:

- HTML(Gratis / Disponible a todos los usuarios)
- PDF / TXT(Disponible a miembros V.I.P. Los miembros con una membresía básica pueden acceder hasta 5 libros electrónicos en formato PDF/TXT durante el mes.)
- Epub y Mobipocket (Exclusivos para miembros V.I.P.)

Para descargar este libro completo, tan solo seleccione el formato deseado, abajo:

