

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

CYBELLE AKEMI SUZUKI DEGANUTTI

ESTUDO DA RESISTÊNCIA À VINCAGEM BASEADO NA INFLUÊNCIA DAS
PROPRIEDADES DO PAPELCARTÃO E DOS PROCESSOS DE
CONVERSÃO VINCO E DOBRA DE EMBALAGENS PARA ALIMENTOS
LÍQUIDOS

CURITIBA

2015

CYBELLE AKEMI SUZUKI DEGANUTTI

ESTUDO DA RESISTÊNCIA À VINCAGEM BASEADO NA INFLUÊNCIA DAS
PROPRIEDADES DO PAPELCARTÃO E DOS PROCESSOS DE
CONVERSÃO VINCO E DOBRA DE EMBALAGENS PARA ALIMENTOS
LÍQUIDOS

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção de grau de Mestre ao Programa Interdisciplinar de Pós-Graduação em Engenharia (PIPE), Área de Concentração de Engenharia e Ciência dos Materiais, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Itsuo Yamamoto
Co-Orientador: Prof. Dr. Osvaldo Vieira

CURITIBA
2015

D317e

Deganutti, Cybelle Akemi Suzuki

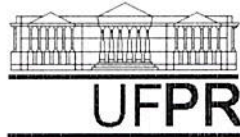
Estudo da resistência à vincagem baseado na influência das propriedades do papelcartão e dos processos de conversão vinco e dobra de embalagens para alimentos líquidos/ Cybelle Akemi Suzuki Deganutti. – Curitiba, 2015.
109 f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais (PIPE), 2015.

Orientador: Carlos Itsuo Yamamoto – Co-orientador: Osvaldo Vieira.
Bibliografia: p. 104-107.

1. Papel - Resistência. 2. Embalagens de papel. 3. Papel - Acabamento - Testes. I. Universidade Federal do Paraná. II. Yamamoto, Carlos Itsuo. III. Vieira, Osvaldo. IV. Título.

CDD: 676.34




UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais- PIPE
Setor de Tecnologia

RELATÓRIO DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Aos vinte dias do mês de fevereiro de 2015, Auditório da Engenharia Química - no Centro Politécnico - UFPR, foi instalada pela Prof.^a Dr.^a Ana Sofia C. M. de Oliveira, coordenadora do PIPE – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, a Banca Examinadora para a ducentésima octogésima nona defesa de dissertação de mestrado na área de concentração: Engenharia e Ciência dos Materiais. Estiveram presentes no ato, além do coordenador do Curso de Pós-Graduação, professores, alunos e visitantes. A Banca Examinadora, atendendo a determinação do colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências dos Materiais, foi constituída pelos professores doutores: Prof. Dr. Carlos Itsuo Yamamoto (UFPR), Ricardo Henrique Moreton Godoi (UFPR), Song Won Park (USP). Às 13:00 horas, a banca iniciou os trabalhos, convidando o candidato **CYBELLE AKEMI SUZUKI DEGANUTTI** a fazer a apresentação da dissertação de mestrado intitulada “**ESTUDO DA RESISTÊNCIA À VINCAGEM BASEADO NA INFLUENCIA DAS PROPRIEDADES DO PAPEL CARTÃO E DOS PROCESSOS DE CONVERSÃO VINCO E DOBRA DE EMBALAGENS PARA ALIMENTOS LÍQUIDOS**”. O referido trabalho teve a co-orientação da Prof. Dr. Osvaldo Vieira. Encerrada a apresentação, iniciou-se a fase de argüição pelos membros participantes. Tendo em vista a dissertação e a argüição, a banca decidiu pela APROVAÇÃO do candidato, (de acordo com a determinação dos artigos 68 e 69 da resolução 65/09 de 09.11.2009).

Curitiba, 20 de fevereiro de 2015.



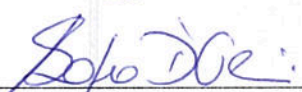
Prof. Dr. Carlos Itsuo Yamamoto
Orientador



Prof. Dr. Ricardo Henrique Moreton Godoi
Examinador



Prof. Dr. Song Won Park
Examinador



Prof.^a Dr.^a Ana Sofia C. M. de Oliveira
Coordenador do PIPE

Ao meu marido Flávio e aos meus filhos Enzo e Davi pela
alegria e incentivo constante.
Aos meus pais Kenji e Ivone e minha irmã Letícia, pelo apoio
em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Paraná pela oportunidade da realização do curso de pós-graduação.

Ao Prof. Dr. Carlos Itsuo Yamamoto, pela orientação competente, pela confiança e, acima de tudo, pela importante contribuição para a minha formação científica.

Ao Prof. Dr. Osvaldo Vieira, pela orientação e acompanhamento, que muito contribuiu ao meu trabalho.

Aos Laboratoristas da Klabin Josilei Ferreira Lima, Antonio Carlos Fogaça e Thiago, pelo auxílio nos experimentos.

Ao Engenheiro da Qualidade Assegurada Hernán Carrizo e especialmente ao Agustín Barros Reyes pelo auxílio no envio de dados e amostras para os experimentos e análises, pelas sugestões e pelo comprometimento.

A Física Clarice Marchese e Thiago Gomes da Silva do Laboratório de Análise de Minerais e Rochas LAMIR da UFPR pelas análises em microtomógrafo computadorizado de raios X.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

Vinco e dobra do papelcartão são duas operações essenciais para a obtenção de uma embalagem de forma bem definida e resistente. A resistência à vincagem (*Relative Crease Strength, RCS*) é uma propriedade especificada para controle do processo de vinco e dobra e é definida como a relação entre o máximo momento de flexão na área do vinco e na área não vincada a um ângulo de 30° a 5°/s. O presente trabalho possui o objetivo de avaliar o *RCS* medido em amostras coletadas do processo industrial real utilizado para controle de processo de vincagem comparado à estudos prévios onde as amostras foram vincadas em vincador de laboratório e avaliar as propriedades do papelcartão bem como os parâmetros dos processos de conversão vinco e dobra capazes de prever *RCS*. Como o *RCS* pode ser medido apenas após a vincagem, o estudo permitirá prever a qualidade de vincagem e ações diretas durante produção do papelcartão. Medições de *RCS* foram realizadas nas direções longitudinal e transversal. A propriedade física do papelcartão que apresentou maior correlação com o *RCS* foi *Ply Bond*. Baseado nesta informação uma produção piloto com baixo *Ply Bond* foi avaliada. Baixos valores de *RCS* foram obtidos, como preditos. Microtomografia de raios X revelou maior estratificação entre camadas do papelcartão com valores mais baixos de *Ply Bond*. Finalmente novos métodos para avaliação da qualidade de vincagem são abordados.

Palavras-chave: *Relative crease strength, RCS*. Papelcartão. Vinco. Dobra. Conversão. Momento de flexão.

ABSTRACT

Creasing and folding of paperboard are two essential operations to obtain a well-defined shape and strength of a package. Relative Crease Strength, *RCS*, is specified for process control of creasing and folding and is defined as the ratio between the maximal bending force for a crease and uncreased sample bend to the bending angle of 30° at a rate of $5^\circ/\text{sec}$. Thus, the present work had as objective to evaluate *RCS* measured in real industrial samples used for process control of creasing compared to previous studies were the samples were creased in a laboratory creaser and evaluate the influence of paperboard properties and converting processes creasing and folding. As *RCS* can be measured only after creasing, the study can give directions to paperboard production process control at Klabin. Creasing measurements were done on both machine direction (MD) and cross machine direction (CD) samples. The paperboard property that showed the highest correlation to *RCS* was Scott Bond. Based on this one pilot production with lower Scott Bond was evaluated. Lower values of *RCS* were obtained, as predicted. X-Ray microtomography revealed higher stratification between fiber layers in the paperboard with lower Scott Bond. Finally new creasing quality evaluation methods are discussed.

Key-words: Relative Crease Strength. *RCS*. Paperboard. Creasing. Folding. Converting. Bending force.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 - MÁQUINA DE FABRICAÇÃO DE PAPEL.....	30
FIGURA 2.2 - ESTRUTURA DO PAPELCARTÃO EM ESTUDO.....	30
FIGURA 2.3 - PERFIL DA ESPESSURA DO PAPELCARTÃO EM M.E.V. COM AUMENTO DE 150 X.....	31
FIGURA 2.4 - CAMADAS DO PAPELCARTÃO EM M.E.V. COM AUMENTO DE 150 X.....	32
FIGURA 2.5 - DIFERENÇA ENTRE PAPELCARTÃO DE UMA CAMADA E MULTICAMADAS NO PROCESSO DE DOBRA.	33
FIGURA 2.6 - O PAPELCARTÃO É IMPRESSO E PASSA PELO PROCESSO DE VINCAGEM.....	34
FIGURA 2.7 - MICROGRAFIAS RETIRADAS EM M.E.V. COM AUMENTO DE 40 X, DEMONSTRANDO (A) VINCADOR MACHO TOCANDO O PAPELCARTÃO MULTICAMADA POSICIONADO SOBRE A FÊMEA (B) VINCADOR MACHO FORÇANDO O PAPELCARTÃO PARA DENTRO DO CANAL DO VINCADOR FÊMEA (C) VINCO PERMANENTE DO CARTÃO ...	36
FIGURA 2.8 - PADRÃO DE VINCAGEM QUE PERMITE A DOBRA DO PAPELCARTÃO EM ÁREAS DEFINIDAS.....	37
FIGURA 2.9 - VINCADOR DE LABORATÓRIO MTS DEMONSTRANDO (A) POSICIONAMENTO DOS PRINCIPAIS COMPONENTES DO EQUIPAMENTO E (B) VINCAGEM DO PAPELCARTÃO.....	38
FIGURA 2.10 - MÉTODO DE MEDIÇÃO DO RCS.....	39
FIGURA 2.11 - EXEMPLO DE PAPELCARTÃO COM MOMENTO MÁXIMO OBTIDO APÓS 30º.....	40
FIGURA 2.12 - EQUIPAMENTO MANUAL LORENTZEN & WETTRE	41
FIGURA 2.13 - EQUIPAMENTO AUTOMÁTICO LORENTZEN & WETTRE ...	41
FIGURA 2.14 - CORTE DAS AMOSTRAS NOS SENTIDOS MD E CD PARA MEDIÇÃO DE RCS.....	42
FIGURA 2.15 - EQUIPAMENTO MARBACH PARA MEDIÇÃO DE FATOR DE DOBRA.....	43
FIGURA 2.16 - CURVAS DA AMOSTRA VINCADA (VERDE) E NÃO VINCADA (VERMELHA).....	43

FIGURA 2.17 - CÁLCULO DO FATOR DE DOBRA.....	44
FIGURA 2.18 - DISTRIBUIÇÃO DOS DADOS OBSERVADOS E REPRESENTAÇÃO EM DIAGRAMA DE CAIXA.	49
FIGURA 4.1- ESQUEMA DE PLACAS E FAIXAS DO MATERIAL IMPRESSO E VINCADO.	56
FIGURA 4.2 - VINCOS E INDICAÇÃO DA ÁREA DE MEDIÇÃO DO CARTÃO NÃO VINCADO PARA CÁLCULO DO RCS.	57
FIGURA 4.3 - AMOSTRAS COM VINCOS CD E MD, RESPECTIVAMENTE.	58
FIGURA 4.4 - DETERMINAÇÃO DE MOMENTO DE FLEXÃO EM EQUIPAMENTO L&W DE ACORDO COM MÉTODO TAPPI T 556.	60
FIGURA 4.5 - DETERMINAÇÃO DE MOMENTO DE DOBRA EM EQUIPAMENTO L&W.	61
FIGURA 5.1 - DADOS DE RCS CD ORDENADOS DE ACORDO COM DATA DE PRODUÇÃO DO PAPELCARTÃO 65	65
FIGURA 5.2 - DADOS DE RCS CD ORDENADOS DE ACORDO COM A DATA DE VINCAGEM.	66
FIGURA 5.3 - DADOS DE RCS MD ORDENADOS DE ACORDO COM A DATA DE FABRICAÇÃO DO PAPELCARTÃO.....	67
FIGURA 5.4 - DADOS DE RCS MD ORDENADOS DE ACORDO COM A DATA DE VINCAGEM.	67
FIGURA 5.5 - CAPABILIDADE DO RCS CD.....	68
FIGURA 5.6 - CAPABILIDADE DO RCS MD	69
FIGURA 5.7 - VALORES PONTUAIS DE RCS MAIS ALTOS NO PERÍODO EM DESTAQUE.....	70
FIGURA 5.8 - RCS MAIS ALTO EM DUAS DATAS DE PRODUÇÃO COM REDUÇÃO DO MOMENTO DE FLEXÃO DO CARTÃO (ÁREA NÃO VINCADA) COMPARATIVAMENTE AO MOMENTO DE FLEXÃO DO VINCO.	71
FIGURA 5.9 - RCS MAIS BAIXO EM DUAS DATAS DE PRODUÇÃO COM AUMENTO DO MOMENTO DE FLEXÃO DO CARTÃO (ÁREA NÃO VINCADA) COMPARATIVAMENTE AO MOMENTO DE FLEXÃO DO VINCO.	72
FIGURA 5.10 - RCS CD É INVERSAMENTE PROPORCIONAL À DIFERENÇA ENTRE O MOMENTO DE FLEXÃO DO CARTÃO E A DO VINCO (MF CARTÃO – MF VINCO).....	73

FIGURA 5.11 - RCS MD É INVERSAMENTE PROPORCIONAL À DIFERENÇA ENTRE O MOMENTO DE FLEXÃO DO CARTÃO E A DO VINCO (MF CARTÃO – MF VINCO).	74
FIGURA 5.12 - REGRESSÃO LINEAR DE RCS CD E MF CARTÃO – MF VINCO.....	75
FIGURA 5.13 - REGRESSÃO LINEAR DE RCS MD E MF CARTÃO – MF VINCO.....	75
FIGURA 5.14 - PERFIL DE MOMENTO DE FLEXÃO DO PAPEL, DO VINCO E RCS DAS SETE FAIXAS DE UMA BOBINA COM VALOR PONTUAL DE RCS ALTO.....	76
FIGURA 5.15 - PERFIL DE MOMENTO DE FLEXÃO DO PAPEL, DO VINCO E RCS DAS SETE FAIXAS DE UMA A BOBINA COM VALOR PONTUAL DE RCS BAIXO.....	77
FIGURA 5.16 - RESISTÊNCIA À FLEXÃO DO PAPELCARTÃO A 30°, 10 MM E A 15°, 50 MM.	78
FIGURA 5.17 - MOMENTO DE DOBRA DE PAPELCARTÃO NÃO VINCADO DA MP-7.....	79
FIGURA 5.18 - MOMENTO DE DOBRA DE PAPELCARTÃO NÃO VINCADO DA MP-7 NA DIREÇÃO CD.	80
FIGURA 5.19 - MOMENTO DE DOBRA DE PAPELCARTÃO DE OUTRO FABRICANTE. (A) DIREÇÃO MD. (B) DIREÇÃO CD.....	81
FIGURA 5.20 - (A) PERFIL DE RCS CD NAS FAIXAS 1 A 7. (B) PERFIL DE PROFUNDIDADE DE VINCO NAS FAIXAS 1 A 7.....	82
FIGURA 5.21 - (A) PERFIL DE RCS MD NAS FAIXAS 1 A 7. (B) PERFIL DE PROFUNDIDADE DE VINCO NAS FAIXAS 1 A 7.....	82
FIGURA 5.22 - (A) PERFIL DE RCS CD NAS PLACAS 1 A 6. (B) PERFIL DE PROFUNDIDADE DE VINCO NAS PLACAS 1 A 6.	83
FIGURA 5.23 - (A) PERFIL DE RCS MD NAS PLACAS 1 A 6. (B) PERFIL DE PROFUNDIDADE DE VINCO NAS PLACAS 1 A 6.	83
FIGURA 5.24 - COMPORTAMENTO DO RCS VARIA COM A PROFUNDIDADE DE VINCO	84
FIGURA 5.25 - REGRESSÃO LINEAR DE RCS CD E PROFUNDIDADE DO VINCO.....	85

FIGURA 5.26 - MENORES VALORES DE PLY BOND: MELHORES VALORES DE RCS.....	86
FIGURA 5.27 - PLY BOND APRESENTA MAIOR IMPACTO SOBRE RCS MD.	86
FIGURA 5.28 - MENORES VALORES DE ZDT: MELHOR FAIXA DE VALORES DE RCS.....	87
FIGURA 5.29 - MENORES VALORES DE ZDT: MELHORES VALORES DE RCS.....	88
FIGURA 5.30 - ESPESSURA NÃO DEMONSTROU CORRELAÇÃO COM RCS	88
FIGURA 5.31 - ESPESSURA POR FAIXA DE RCS	89
FIGURA 5.32 - SCT MD E CD POR FAIXA DE RCS	89
FIGURA 5.33 - RESISTÊNCIA À FLEXÃO GM E ÍNDICE POR FAIXA DE RCS	90
FIGURA 5.34 - TRAÇÃO E RCS SÃO DIRETAMENTE PROPORCIONAIS. RCS CD É INFLUENCIADO PELA TRAÇÃO CD.....	90
FIGURA 6.1 - MODELOS IDENTIFICADOS COM A FERRAMENTA BEST SUBSET REGRESSION DO MINITAB® 16.....	93
FIGURA 6.2 - RCS CD DAS BOBINAS TESTADAS	94
FIGURA 6.3 - RCS MD DAS BOBINAS TESTADAS.....	95
FIGURA 6.4 - RCS CD DA MP-7 E DA MP-9.....	96
FIGURA 6.5 - RCS MD DA MP-7 E DA MP-9	96
FIGURA 6.6 - PAPELCARTÃO DA MP-7 - VINCO LONGITUDINAL À ESQUERDA E VINCO TRANSVERSAL À DIREITA	97
FIGURA 6.7 - PAPELCARTÃO DA MP-9 - VINCO LONGITUDINAL À ESQUERDA E VINCO TRANSVERSAL À DIREITA	98
FIGURA 6.8 - PAPELCARTÃO DA MP-7 COM PLY BOND MAIS BAIXO - VINCO LONGITUDINAL, COM MAIOR ESTRATIFICAÇÃO ENTRE AS CAMADAS FIBROSAS.....	98
FIGURA 6.9 - REGIÃO DE INTERESSE DO PAPELCARTÃO DA MP-7, VINCO TRANSVERSAL.	99
FIGURA 6.10 - REGIÃO DE INTERESSE DO PAPELCARTÃO DA MP-9, VINCO LONGITUDINAL.....	99

FIGURA 6.11 - REGIÃO DE INTERESSE DO PAPELCARTÃO DA MP-7 COM PLY BOND MAIS BAIXO, VINCO LONGITUDINAL.....	99
---	----

LISTA DE TABELAS

TABELA 6.1 - TABELA DE VARIÁVEIS DA REGRESSÃO.....	92
TABELA 6.2 - PARÂMETROS DA ANÁLISE EM MICROTOMÓGRAFO.....	100

LISTA DE SIGLAS

<i>CD</i>	- Sentido transversal da máquina de papel (<i>Cross Direction</i>)
<i>CTMP</i>	- Polpa quimio termo mecânica (<i>Chemi Termo Mechanical Pulp</i>)
<i>ECF</i>	- Livre de Cloro elementar (<i>Elementary Chlorine Free</i>)
<i>MD</i>	- Sentido longitudinal da máquina de papel (<i>Machine Direction</i>)
<i>GM</i>	- Geométrica (<i>Geometrical</i>)
M.E.V.	- Microscópio Eletrônico de Varredura
MP	- Máquina de Papel
MF	- Momento de Flexão
RF	- Resistência à Flexão
<i>RCS</i>	- Resistência à vincagem (<i>Relative Crease Strength</i>)
<i>SCT</i>	- Resistência à compressão (<i>Short Compression Strength</i>)
<i>TAPPI</i>	- Associação Técnica da Indústria de Celulose e Papel (<i>Technical Association of the Pulp and Paper Industry</i>)
<i>ZDT</i>	- Resistência à tração na direção Z (<i>Z Direction Tensile Strength</i>)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	27
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	29
2.1	FABRICAÇÃO DE PAPELCARTÃO	29
2.2	ESTRUTURA DO PAPELCARTÃO	30
2.3	PRODUÇÃO DO MATERIAL DE EMBALAGEM	34
2.4	PROCESSO DE VINCAGEM	34
2.4.1	Padrão de vincagem industrial	36
2.4.2	Vincador de laboratório.....	37
2.5	DESENVOLVIMENTO DO TESTE DE RCS.....	38
2.6	MÉTODOS DE MEDIÇÃO	40
2.6.1	Equipamentos alternativos para medição de vincagem	43
2.6.2	Propriedades do papelcartão.....	45
2.7	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	47
2.7.1	Cp e Cpk.....	47
2.7.2	Diagrama de caixa ou <i>boxplot</i>	48
2.7.3	p-valor.....	49
2.8	CARACTERIZAÇÃO DA QUALIDADE DE VINCAGEM	50
3	OBJETIVO GERAL E OBJETIVOS ESPECÍFICOS	53
3.1	OBJETIVO GERAL.....	53
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	53
4	MATERIAL E MÉTODOS.....	54
4.1	MATERIAL E CONDUÇÃO EXPERIMENTAL	54
4.2	AVALIAÇÃO DOS DADOS	54
4.3	AVALIAÇÃO DA CAPABILIDADE DO PROCESSO.....	55
4.4	MEDIÇÃO DE RELATIVE CREASE STRENGTH - RCS.....	55
4.4.1	Análise das medições individuais de momento de flexão do papelcartão e do vinco.....	59
4.4.2	Comparativo de medição de momento de flexão: TAPPI T 556 e método para determinação de RCS.....	59
4.4.3	Avaliação do ângulo de máximo momento	60

4.4.4	Avaliação do comportamento do <i>RCS</i> e profundidade de vinco ao longo do perfil transversal da bobina.....	61
4.4.5	Avaliação do comportamento do <i>RCS</i> e profundidade de vinco ao longo do perfil longitudinal da bobina	61
4.4.6	Investigação das propriedades físicas do papelcartão e sua influência no comportamento do <i>RCS</i>	62
4.4.7	Avaliação de desempenho das variáveis	62
4.4.8	Teste industrial com papelcartão produzido na Máquina de papel 7 (MP-7) e Máquina de papel 9 (MP-9)	63
4.5	Avaliação em microtomógrafo de raios X.....	63
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	65
5.1	ANÁLISE DE <i>RCS</i>	65
5.1.1	Ordenação dos dados de acordo com a data de produção do papelcartão e de acordo com a data de vincagem	65
5.1.2	Capabilidade do processo.....	68
5.1.3	Análise das medições individuais de momento de flexão do papelcartão e do vinco	69
5.2	COMPARATIVO DE MEDIÇÃO DE MOMENTO DE FLEXÃO: TAPPI T 556 E MÉTODO PARA DETERMINAÇÃO DE <i>RCS</i>	78
5.3	AVALIAÇÃO DO ÂNGULO DE MÁXIMO MOMENTO	79
5.4	AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO <i>RCS</i> E PROFUNDIDADE DE VINCO AO LONGO DO PERFIL TRANSVERSAL DA BOBINA.....	81
5.5	AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO <i>RCS</i> E PROFUNDIDADE DE VINCO AO LONGO DO PERFIL LONGITUDINAL DA BOBINA	83
5.6	AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO <i>RCS</i> VERSUS PROFUNDIDADE DE VINCO.....	84
5.7	INVESTIGAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO PAPELCARTÃO E SUA INFLUÊNCIA NO COMPORTAMENTO DO <i>RCS</i>	85
6	AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DAS VARIÁVEIS	91
6.1	TESTE DE CONVERSÃO DE BOBINAS COM VALORES MAIS BAIXOS DE <i>PLY BOND</i>	94
6.2	TESTE INDUSTRIAL EM NOVO VINCADOR COM NOVE FAIXAS DE IMPRESSÃO UTILIZANDO PAPELCARTÃO DA MP-7 COM <i>PLY BOND</i> ALTO E PAPELCARTÃO DA MP-9	95

6.3 AVALIAÇÃO EM MICROTOMÓGRAFO DE RAIOS X DAS AMOSTRAS DA MP-7 E MP-9 UTILIZADAS NO TESTE INDUSTRIAL REALIZADO NO NOVO VINCADOR	97
6.4 AVALIAÇÃO DO VOLUME DE POROS EM MICROTOMÓGRAFO	98
7 CONCLUSÕES.....	101
8 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	103
REFERÊNCIAS	104
APÊNDICE.....	108

1 INTRODUÇÃO

O objetivo da vincagem do papelcartão é produzir linhas de vinco bem definidas que facilitam a operação de dobra e proporcionam a formação de uma embalagem de forma e funcionalidade desejada (IGGESUND, 2014).

Má qualidade de vincagem pode afetar a forma da embalagem final e impactar a imagem do produto nas prateleiras; prejudicar o desempenho durante empilhamento, levando a amassamento; aumentar a probabilidade de trincas, que podem afetar a integridade da embalagem e do produto envasado, constituindo-se um risco à segurança do produto.

A qualidade de vincagem é controlada através da medição de Resistência à Vincagem ou *RCS (Relative Crease Strength)*. Especificações de *RCS* nas direções longitudinal (*MD – Machine Direction*) e transversal (*CD – Cross Direction*) foram definidas para garantir uniformidade no processo de vincagem (TRYDING, 2012).

Ocorrências de *RCS* fora de especificação são motivos de reclamação e têm sido alvo de investigação e estudo há muitos anos (TRYDING *et al.*, 2007; ALBERIUS *et al.*, 2010; SEBES, 2010).

O problema é que a análise de *RCS* só pode ser realizada após a vincagem do material, impedindo uma ação direta durante a produção do papelcartão.

Este trabalho procura correlacionar quais e como as propriedades físicas, que são avaliadas durante a fabricação, e as características do material influenciam no processo de vincagem e conseqüentemente no resultado de *RCS*.

As perguntas que surgem são:

- (1) É possível prever o comportamento do *RCS* durante a produção do papelcartão?
- (2) Quais propriedades físicas do papelcartão são mais relacionadas ao *RCS*?
- (3) O *RCS* é o melhor parâmetro para avaliar qualidade de vincagem?

Para responder a estas perguntas uma série de investigações foram realizadas, como, análise individual do momento de flexão do papelcartão e do vinco, comparativo de medição do momento de flexão via método TAPPI T 556 e método para determinação de *RCS*, determinação do ângulo de máximo momento, avaliação do comportamento do *RCS* a diferentes profundidades de vinco,

investigação das propriedades físicas do papelcartão e sua influência sobre o *RCS* e por fim uma avaliação de desempenho das variáveis, a fim de selecionar a principal característica para avaliação em teste industrial focado, com seleção de amostras de melhor e pior desempenho para análise em microtomógrafo de raios X.

Este trabalho foi estruturado em nove capítulos. No Capítulo 2 é apresentada uma revisão de literatura sobre o tema, pontuando os aspectos importantes que influenciam este trabalho.

Os objetivos gerais e específicos são detalhados no Capítulo 3.

A metodologia de trabalho é apresentada no Capítulo 4 e os resultados são apresentados no Capítulo 5.

A avaliação de desempenho das variáveis é apresentada no Capítulo 6 e as conclusões são detalhadas no Capítulo 7.

As considerações finais e as referências são apresentadas nos Capítulos 8 e 9, respectivamente.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 FABRICAÇÃO DE PAPELCARTÃO

A tecnologia de fabricação de papelcartão fez grandes avanços desde sua descoberta há mais de 2.000 anos pelos chineses. Independente da natureza da polpa se química, mecânica ou reciclada, fibra longa ou fibra curta, polpa marrom ou branqueada, o básico da fabricação de papel é similar (BRACELPA, 2014).

A suspensão de celulose passa por refinadores e depuradores, e aditivos químicos são adicionados para promover as propriedades de qualidade requeridas para cada tipo de papel (ópticas, mecânicas e químicas) (BERNI *et al.*, 2010).

A polpa e os aditivos químicos são misturados em uma suspensão com concentração menor de 1% em massa, a qual é distribuída pela caixa de entrada sobre uma tela formadora para desaguamento (IGGESUND, 2014).

A máquina de papel pode ter mais de uma mesa de formação, no caso do papelcartão produzido possuir várias camadas.

Ao final da mesa plana a polpa passa por prensas úmidas para retirar a maior quantidade de água possível antes de entrar na seção de secagem, onde o papelcartão entra em contato com cilindros secadores aquecidos internamente por vapor, que extrai a água por evaporação (DEGANUTTI, 2001).

Após a secagem o acabamento superficial pode ser melhorado com aplicação de tinta de revestimento e calandragem (BERNI *et al.*, 2010).

No final da máquina o papelcartão é enrolado em rolos denominados jumbo, que são rebobinados e segmentados em bobinas menores (FIGURA 2.1).

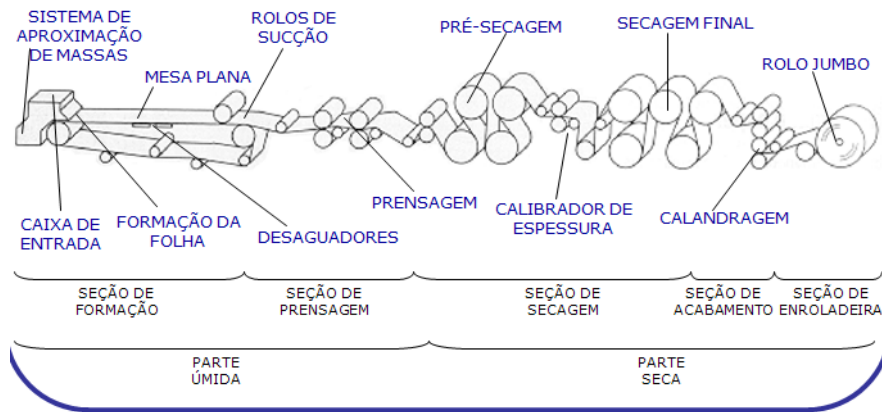


FIGURA 2.1 - MÁQUINA DE FABRICAÇÃO DE PAPEL.
FONTE: KLABIN (2010)

2.2 ESTRUTURA DO PAPELCARTÃO

A estrutura do papelcartão em estudo é apresentada na FIGURA 2.2. Ele é fabricado a partir de fibras virgens obtidas por processo Kraft e polpa de alto rendimento. A base do papelcartão é composta de celulose de fibra longa não branqueada, a camada do meio uma mistura de fibras curtas, longas e CTMP (Polpa químio termo mecânica) e a camada cobertura composta por um mistura de fibra curta e longa branqueada por processo ECF (Livre de Cloro Elementar) (KLABIN, 2010).

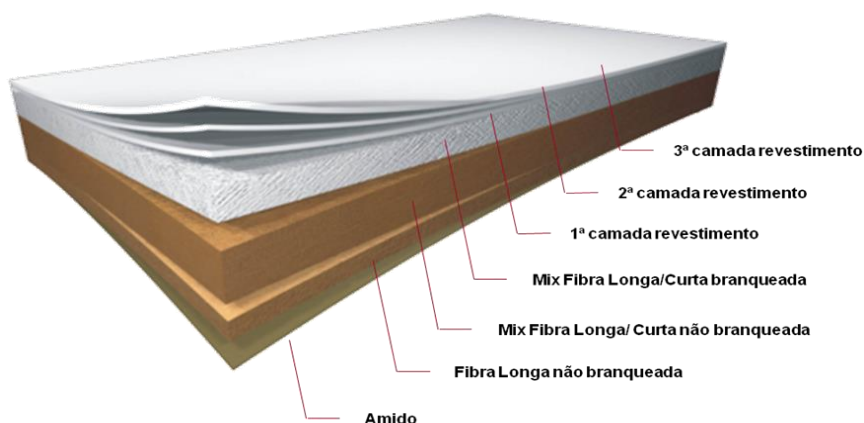


FIGURA 2.2 - ESTRUTURA DO PAPELCARTÃO EM ESTUDO.
FONTE: KLABIN (2010)

O papelcartão é comumente considerado um material ortotrópico, suas propriedades mecânicas são únicas e independem das direções de três eixos mutuamente perpendiculares (HUANG, 2011).

As propriedades mecânicas do papelcartão são descritas nas direções longitudinal ou 'machine direction' (*MD*), transversal ou 'cross direction' (*CD*) e no sentido da espessura ou direção *Z*. Cada camada apresenta uma determinada orientação das fibras (HUANG, 2011).

Na FIGURA 2.3 é possível visualizar o perfil da espessura de uma amostra de papelcartão observada ao microscópio eletrônico de varredura (M.E.V.) e na FIGURA 2.4 apresenta-se a identificação das camadas cobertura, meio e base.

A orientação das fibras e a força das ligações fibra-fibra impactam no comportamento mecânico do material (BORGQVIST, 2014).

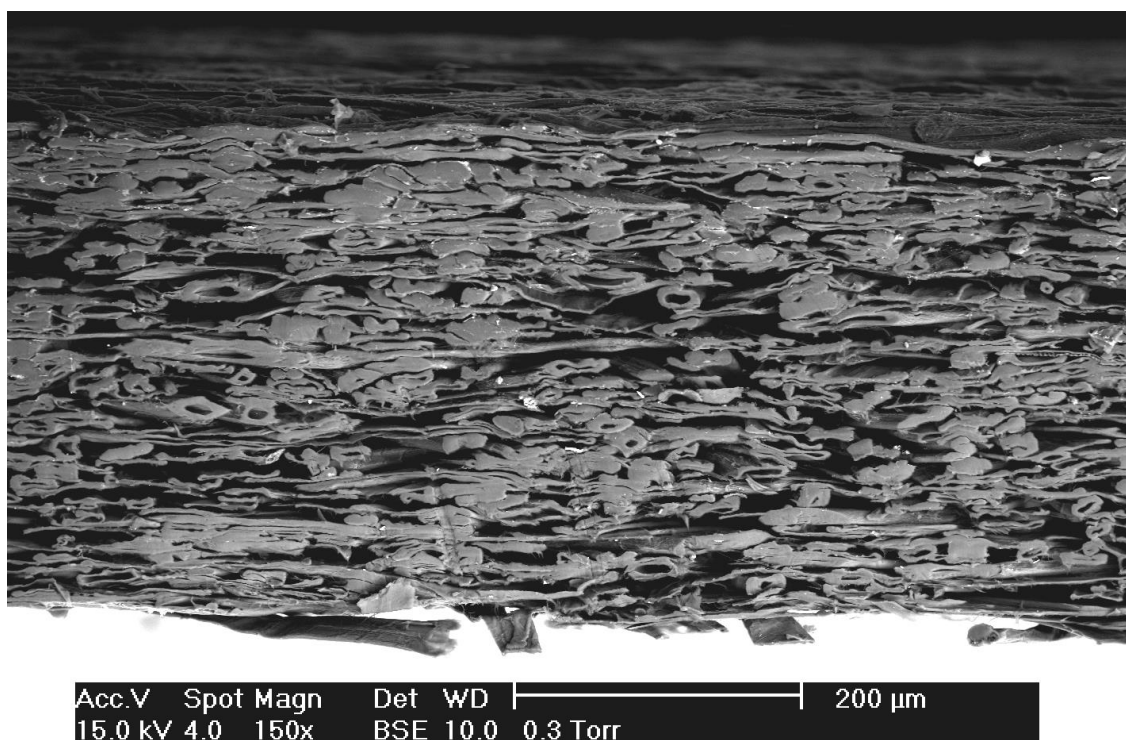


FIGURA 2.3 - PERFIL DA ESPESSURA DO PAPELCARTÃO EM M.E.V. COM AUMENTO DE 150 X.
FONTE: HUANG (2011)

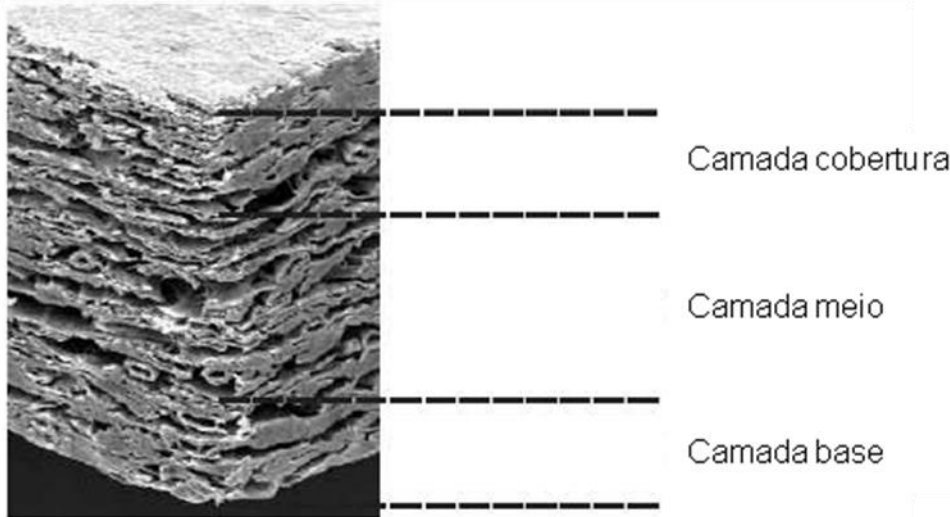


FIGURA 2.4 - CAMADAS DO PAPELCARTÃO EM M.E.V. COM AUMENTO DE 150 X.
 FONTE: LILLIENBERG ET AL. (2009)

O papelcartão pode ser produzido com uma ou múltiplas camadas.

O papelcartão de múltiplas camadas combina propriedades de interesse de diferentes tipos de polpa utilizadas em cada uma delas. Particularmente, a estrutura multicamada proporciona benefícios ao processo de vincar e dobra como pode ser visto na FIGURA 2.5 (ALBERIUS *et al.*, 2010).

Cada camada possui propriedades diferentes. Normalmente a camada do meio é mais espessa e frágil. As características individuais de cada camada e a construção do papelcartão como um todo possuem grande influência sobre a capacidade de vincar e dobrar do mesmo (IGGESUND, 2014).

A capacidade de vincar do papelcartão está relacionada a:

- Habilidade do papelcartão em permitir vincos tanto profundos quanto superficiais sem trincar;
- A habilidade do papelcartão de adaptar-se ao formato do vincador e manter a geometria desejada do vinco;
- Menor sensibilidade do papelcartão às variações da vincagem (largura, profundidade e espessura), por exemplo, quando o vincador desgasta-se. A resistência à compressão do papelcartão é, em geral, duas a três vezes menor que a resistência à tração. O material colapsa onde as forças de compressão começam a aparecer, enquanto as camadas superficiais não são afetadas e mantêm sua resistência à tração. As áreas sob compressão são inicialmente delaminadas em

várias camadas finas. Durante o processo de dobra ocorre a delaminação e as camadas superficiais onde a resistência à tração não é afetada cria uma espécie de dobradiça (IGGESUND, 2014).

Evidentemente a vincagem é um processo severo. As camadas superficiais do papelcartão, incluindo a camada de revestimento devem ser fortes o suficiente para suportar as forças aplicadas. As camadas podem vir a romper quando o limite de profundidade do vinco for excedido ou durante a dobra (IGGESUND, 2014).



FIGURA 2.5 - DIFERENÇA ENTRE PAPELCARTÃO DE UMA CAMADA E MULTICAMADAS NO PROCESSO DE DOBRA.
FONTE: ALBERIUS ET AL. (2010)

O objeto de estudo e motivador deste trabalho é o papelcartão produzido na Máquina de Papel 7 (MP-7), de fabricação Voith (1979), que possui largura útil de 6,10 m e velocidade máxima de produção de 700 m/min. É dotada de duas mesas planas (primária e secundária), e duas caixas de entrada: a caixa de entrada principal e a caixa secundária. A caixa de entrada principal de conceito '*Strataflow*' recebe o fluxo das camadas base e meio, que passam por câmaras diferenciadas na caixa e entram em contato somente ao serem lançadas pelo lábio. A caixa de entrada secundária é responsável pela camada branca de cobertura, sendo seu jato recebido pelos desaguadores do Bel Liner (DEGANUTTI, 2001).

A introdução do papelcartão da Máquina de Papel 9 (MP-9), pertencente à mesma unidade industrial, possibilitou comparativo de desempenho em vincagem com o papelcartão da MP-7. A Máquina de Papel 9, de fabricação Voith (2007), possui largura útil de 6,60 m e velocidade máxima de 750 m/min. É dotada de três mesas planas e três caixas de entrada. As camadas base, meio e cobertura são formadas individualmente.

2.3 PRODUÇÃO DO MATERIAL DE EMBALAGEM

A produção do material de embalagem consiste de três processos principais: impressão, vincagem e laminação. Primeiramente o papelcartão é impresso para se tornar mais atrativo ao consumidor, após é vincado e dobrado nos vincos quando a embalagem é envasada, conforme ilustrado na FIGURA 2.6 (JUST *et al.*, 2003).

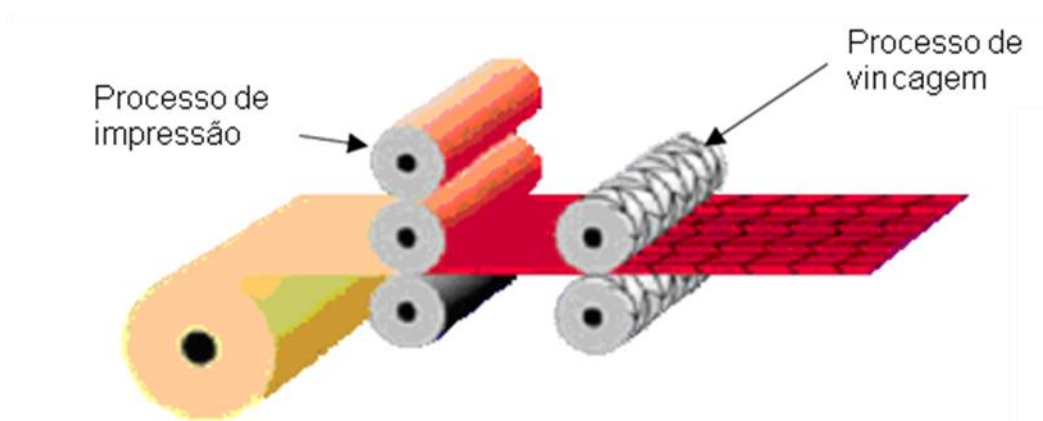


FIGURA 2.6 - O PAPELCARTÃO É IMPRESSO E PASSA PELO PROCESSO DE VINCAGEM.
FONTE: JUST *ET AL.* (2003)

A laminação constitui-se de diversas camadas intercaladas de polietileno e alumínio em ambas as faces do papelcartão que conferem propriedades de barreira à luz e à umidade, preservando o produto envasado por meses (WALTER, 2004).

2.4 PROCESSO DE VINCAGEM

A conversão do papelcartão em uma embalagem passa pelo processo de dobra, que para ser eficiente deve ser precedido pela vincagem.

Se a vincagem não é realizada, a superfície do papelcartão pode trincar, a dobra não fica alinhada no ponto desejado e a formação da caixa é prejudicada, levando a dificuldades de empilhamento e má aparência da embalagem (SEBES, 2010).

A vincagem pode ser realizada por elementos rotativos ou em mesas planas.

O processo de vincagem é realizado em elementos rotativos onde o macho e a fêmea são montados em cilindros separados. Estes cilindros são pressionados em conjunto, com o papelcartão entre eles. Durante o processo, o papelcartão é sujeito à tensão na direção longitudinal do cartão.

O vinco é uma zona onde o papelcartão é intencional e permanentemente afetado. No vinco ocorre a delaminação do material, deformação plástica e a resistência à dobra é reduzida. O vinco é como uma dobradiça, onde a dobra é apta a iniciar e se desenvolver (JUST *et al.*, 2003).

Uma boa vincagem é caracterizada pela delaminação do papelcartão em várias camadas sem rompimento. O momento de flexão (MF) é reduzido na área do vinco comparativamente às outras áreas do cartão. Durante a dobra a delaminação continua entre as camadas. Uma ilustração destes passos é mostrada na FIGURA 2.7 (SEBES, 2010).

As propriedades cruciais do papelcartão para a vincagem são: elasticidade e alongação, a resistência à tração, a resistência à compressão, o momento de flexão, a resistência à delaminação, a planicidade e a estabilidade dimensional (IGGESUND, 2014).

Elasticidade, resistência à tração e alongação são parâmetros importantes para as camadas superficiais a fim de evitar trincas. Igualmente importantes são as forças de compressão, responsáveis pela delaminação inicial no interior do papelcartão. A resistência entre camadas deve situar-se em um determinado intervalo, não muito alto e não muito baixo, a fim de permitir a delaminação durante a vincagem mas ao mesmo tempo manter o cartão intacto durante o processo de dobra e uso do produto. O melhor resultado de vincagem é obtido quando o papelcartão delamina-se em um maior número possível de camadas sem danificar-se (IGGESUND, 2014).

Nygards (2013) avaliou o efeito de diferentes velocidades de vincagem sobre o papelcartão. Para os vincos longitudinais observou-se que não há diferença significativa no momento de flexão bem como no processo de dobra. O mesmo não se aplica aos vincos transversais: o aumento da velocidade de vincagem aumenta o momento de flexão para o mesmo papelcartão.

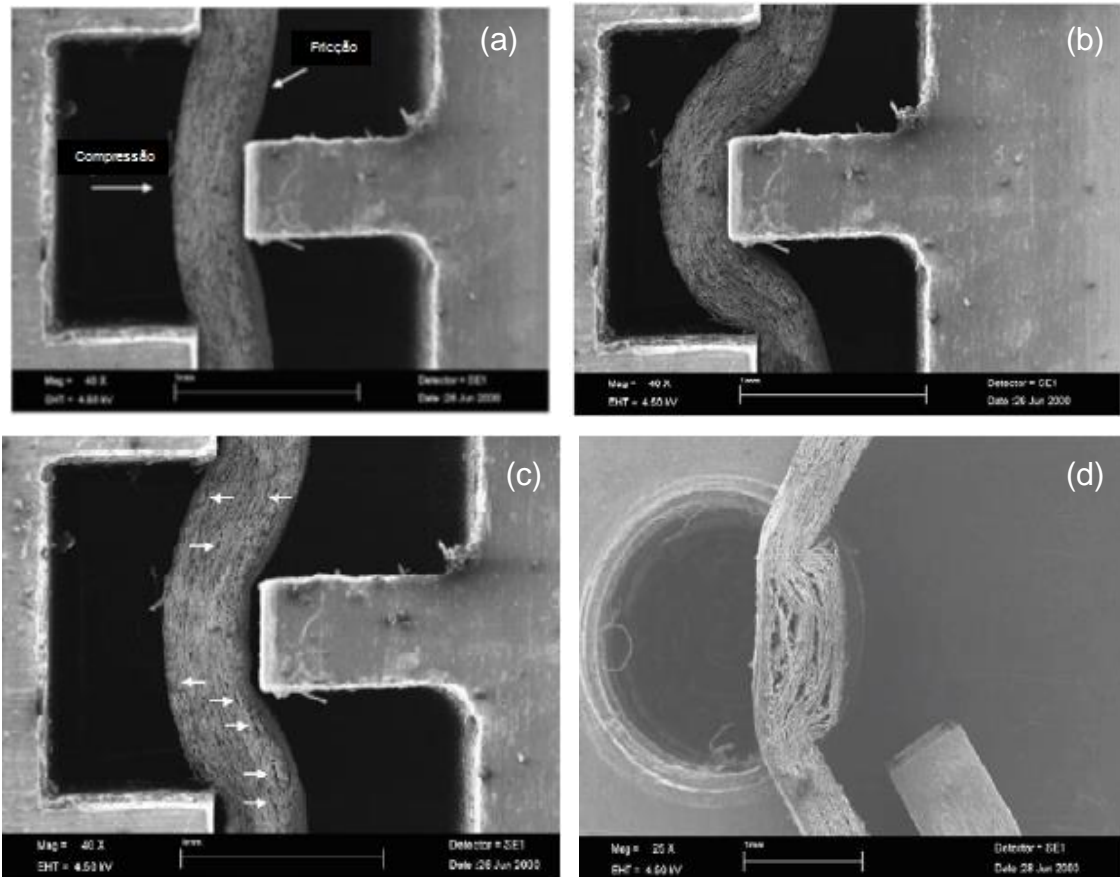


FIGURA 2.7 - MICROGRAFIAS RETIRADAS EM M.E.V. COM AUMENTO DE 40 X, DEMONSTRANDO (A) VINCADOR MACHO TOCANDO O PAPELCARTÃO MULTICAMADA POSICIONADO SOBRE A FÊMEA (B) VINCADOR MACHO FORÇANDO O PAPELCARTÃO PARA DENTRO DO CANAL DO VINCADOR FÊMEA (C) VINCO PERMANENTE DO CARTÃO (D) PAPELCARTÃO DOBRADO AO LONGO DO VINCO, COM EVIDENTE DELAMINAÇÃO ENTRE CAMADAS.
 FONTE: SEBES (2010)

Segundo Beex e Perlings (2012) o processo de vincagem é essencial para evitar trincas da camada cobertura durante a dobra, principalmente em papelcartão de alta gramatura.

2.4.1 Padrão de vincagem industrial

Para assegurar uma embalagem com formas bem definidas um padrão de vincagem (FIGURA 2.8) é importante para o processo subsequente de dobra da embalagem a alta velocidade (LILLIENBERG *et al.*, 2009). Vincos longitudinais,

transversais e diagonais, linhas de corte e perfuração e delimitação do orifício compõem o padrão de vincagem.

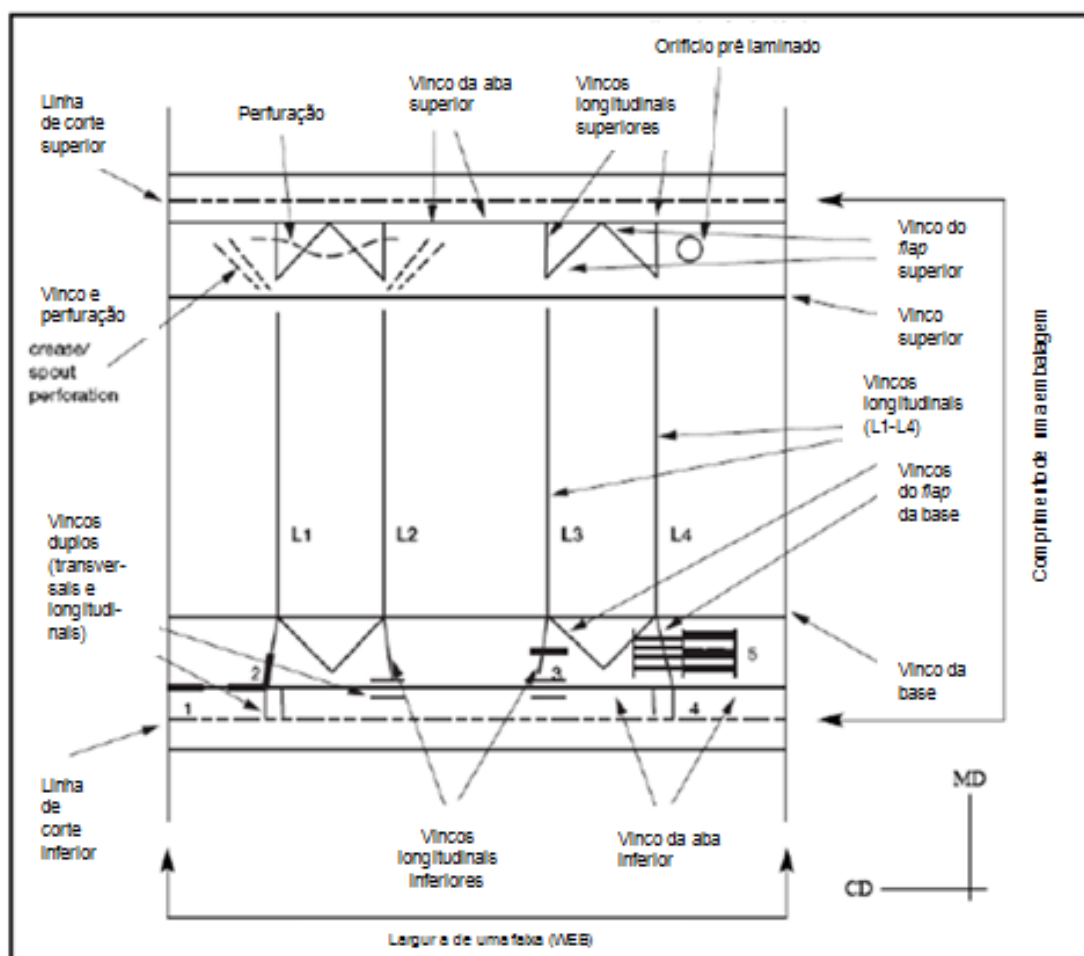


FIGURA 2.8 - PADRÃO DE VINCAGEM QUE PERMITE A DOBRA DO PAPELCARTÃO EM ÁREAS DEFINIDAS.

FONTE: LILLIENBERG *ET AL.* (2009)

2.4.2 Vincador de laboratório

Um vincador de laboratório denominado MTS 858 Table Top System foi utilizado em diversos trabalhos de vincagem experimental. O macho é restrito para mover-se apenas na direção z e a fêmea é montada sobre uma célula de carga de 15 kN (FIGURA 2.9).

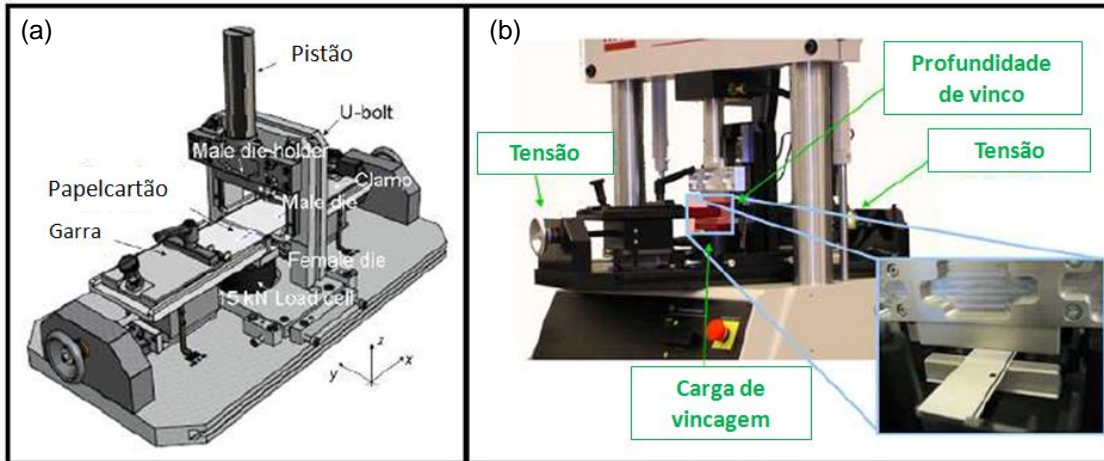


FIGURA 2.9 - VINCADOR DE LABORATÓRIO MTS DEMONSTRANDO (A) POSICIONAMENTO DOS PRINCIPAIS COMPONENTES DO EQUIPAMENTO E (B) VINCAGEM DO PAPELCARTÃO. FONTE: LILLIENBERG *ET AL.* (2009)

2.5 DESENVOLVIMENTO DO TESTE DE RCS

Uma forma de determinar o efeito do processo de vincagem é comparar o momento de flexão do vinco com uma área não vincada. Esta relação é chamada *Relative Crease Strength (RCS)* e é definida pela razão entre o momento de flexão máximo do vinco e do cartão (na área não vincada) conforme Equação (2.1), a um ângulo de 30° a uma velocidade de 5°/s de acordo com a FIGURA 2.10 (TRYDING, 2012).

$$RCS = \frac{M_{Vinc}^{Máx}}{M_{Cartão}^{Máx}} \quad (2.1)$$

O momento de flexão é determinado por $M=F.L$, onde M é o momento em mN.m, F é a resistência à flexão em mN e L a distância do suporte à célula de carga, neste caso 0,01 m (SEBES, 2010).

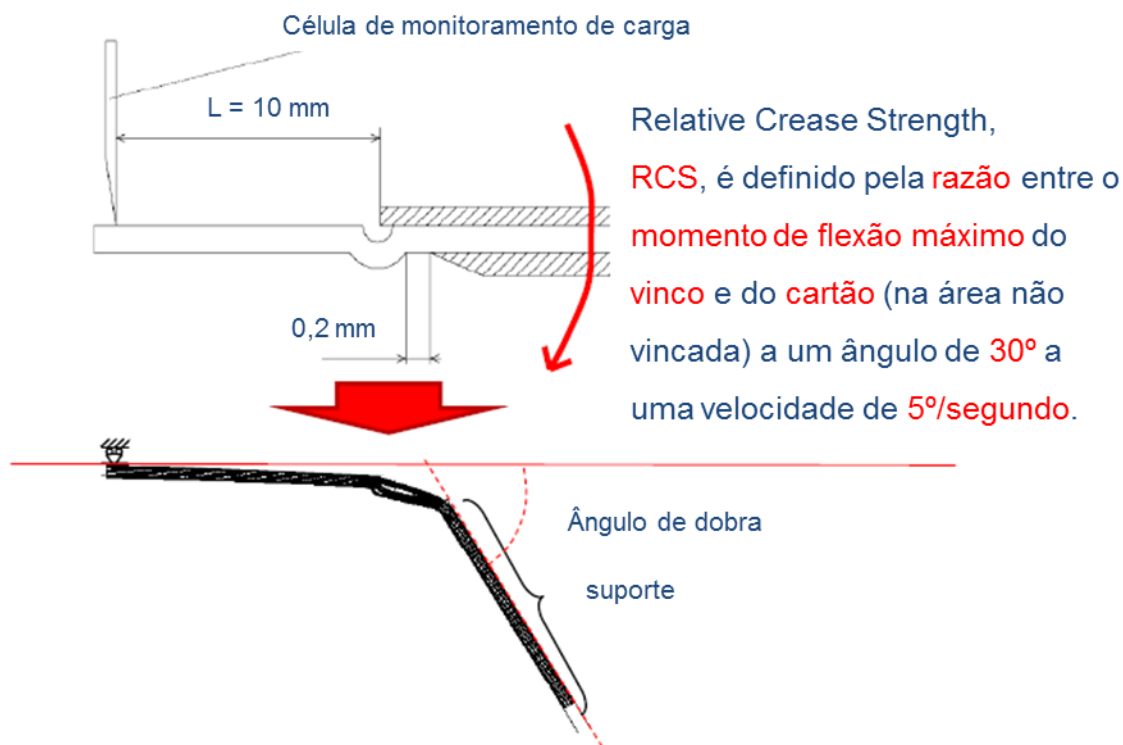


FIGURA 2.10 - MÉTODO DE MEDIÇÃO DO RCS.
 FONTE: TRYDING (2007)

O valor de *RCS especificado* é limitado a uma janela angular por definição, mas pode ser testado em diferentes ângulos. A expressão RCS_{Peak} refere-se ao ângulo total de 120 graus e RCS_{30} refere ao ângulo de 30 graus. RCS_{Peak} é relevante quando se tem um determinado ângulo de quebra definido para o material vincado e não vincado.

O RCS_{30} é relevante, mas apresenta desvantagem quando o material não vincado possui um ponto de quebra acima de 30 graus. A FIGURA 2.11 apresenta o Momento de flexão em função do Ângulo de dobra, onde é possível observar que a amostra não vincada, $L=10$ mm, apresenta ponto de quebra em torno de 35 graus.

Neste trabalho será utilizado o RCS_{30} , que é referência para o controle de qualidade durante o processo de vincagem.

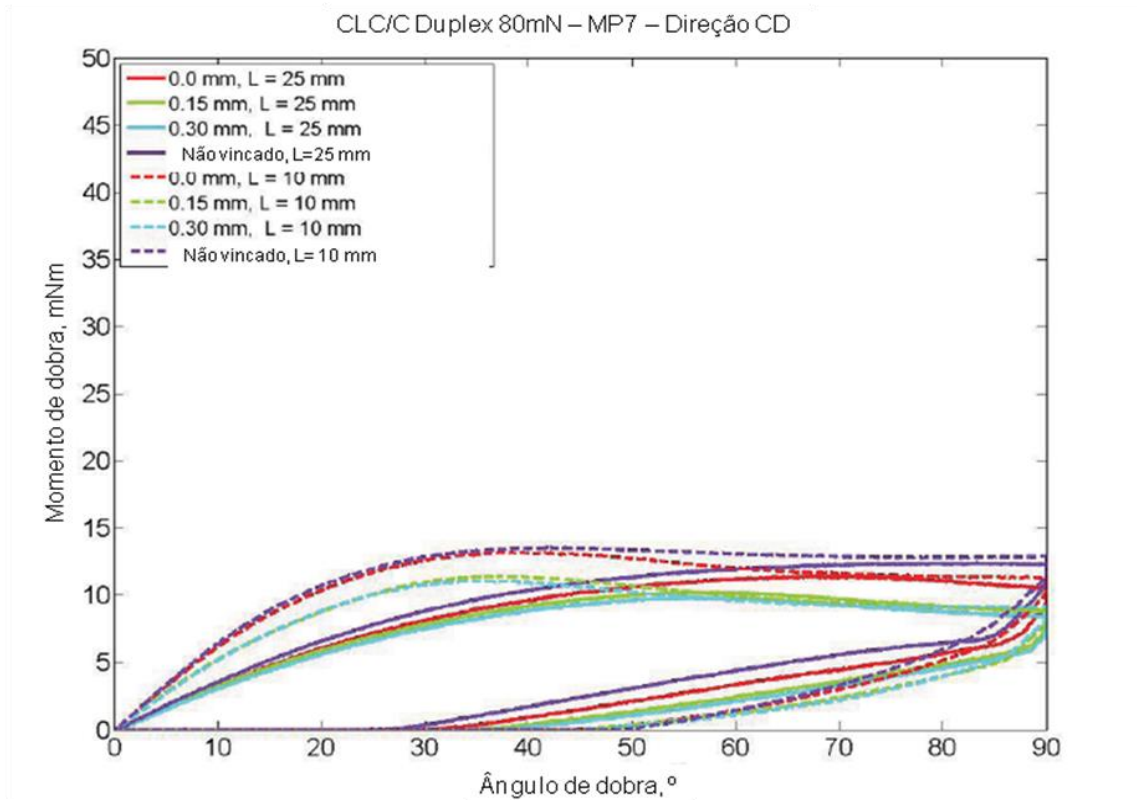


FIGURA 2.11 - EXEMPLO DE PAPELCARTÃO COM MOMENTO MÁXIMO OBTIDO APÓS 30°.
 FONTE: SEBES (2010)

2.6 MÉTODOS DE MEDIÇÃO

A análise de *RCS* pode ser executada em equipamento manual ou automático.

No equipamento manual (FIGURA 2.12) os corpos de prova devem ser cortados manualmente vinco a vinco de forma a possibilitar o posicionamento de cada amostra no suporte que prende a amostra para realização da medição.

Deve-se tomar cuidado ao posicionar manualmente a amostra no suporte a fim de garantir o paralelismo.



FIGURA 2.12 - EQUIPAMENTO MANUAL LORENTZEN & WETTRE

O equipamento automático (FIGURA 2.13) possui um leitor ótico que identifica o posicionamento dos vincos. É possível inserir uma amostra com toda a extensão longitudinal ou transversal de uma embalagem.



FIGURA 2.13 - EQUIPAMENTO AUTOMÁTICO LORENTZEN & WETTRE
FONTE: O AUTOR (2012)

No equipamento automático inicia-se a análise com uma amostra em forma de tira cortada no sentido longitudinal da embalagem conforme ilustrado na FIGURA 2.14. Os quatro vincos transversais são identificados e o equipamento realiza as medições de momento de flexão no vinco e na área não vincada correspondente.

Em seguida introduz-se uma tira da extensão transversal da embalagem para medição dos quatro vincos longitudinais, bem como a área não vincada correspondente. O equipamento calcula automaticamente o RCS dos quatro vincos longitudinais e dos quatro vincos transversais.

Além da agilidade o posicionamento correto da amostra é um ponto a destacar.

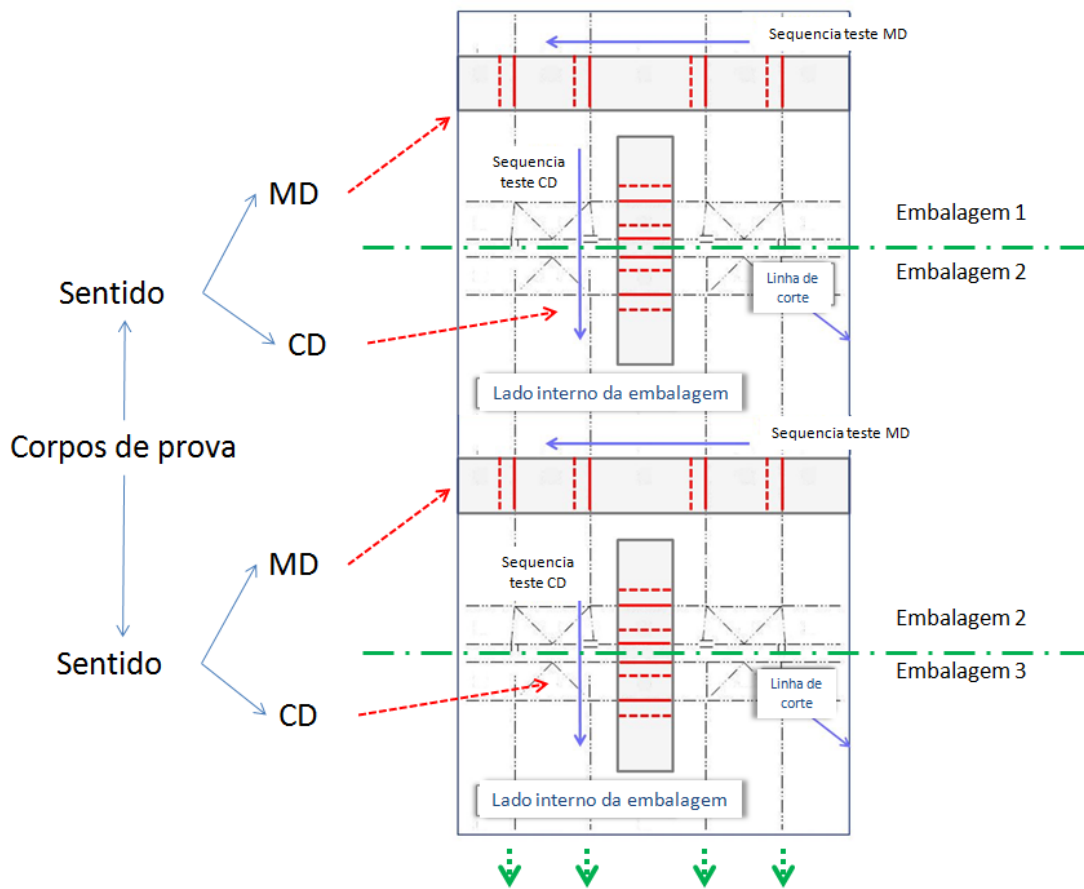


FIGURA 2.14 - CORTE DAS AMOSTRAS NOS SENTIDOS MD E CD PARA MEDIÇÃO DE RCS
FONTE: O AUTOR (2012)

2.6.1 Equipamentos alternativos para medição de vincagem

Baseado no método DIN 53121, o equipamento da Marbach (Figura 2.15) fornece a curva do momento de flexão obtida durante a execução do teste da amostra vincada e da amostra não vincada de 0 a 160°.



FIGURA 2.15 - EQUIPAMENTO MARBACH PARA MEDIÇÃO DE FATOR DE DOBRA.
FONTE: MARBACH (2012)

O “*Bending Factor*” mais conhecido com “*Folding Factor*” (fator de dobra) indica a redução relativa do momento entre a amostra vincada e não vincada (Figuras 2.16 e 2.17).

Cálculo do fator de dobra

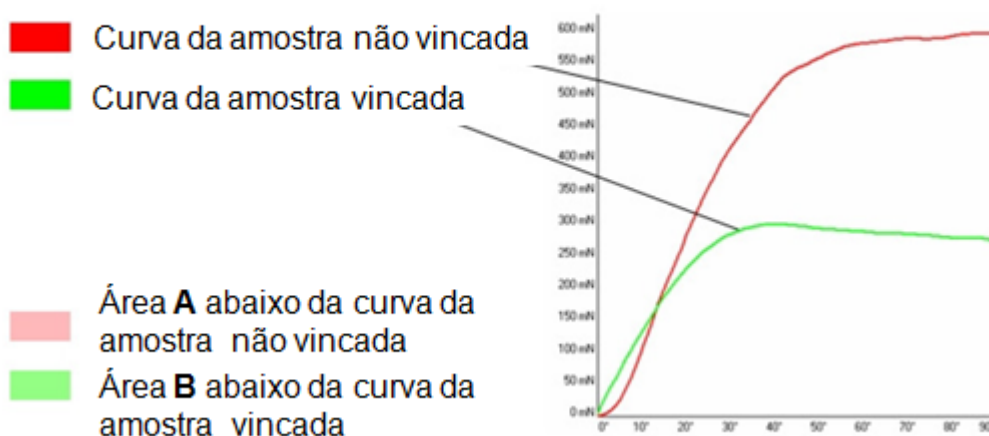


FIGURA 2.16 - CURVAS DA AMOSTRA VINCADA (VERDE) E NÃO VINCADA (VERMELHA)
FONTE: MARBACH (2012)

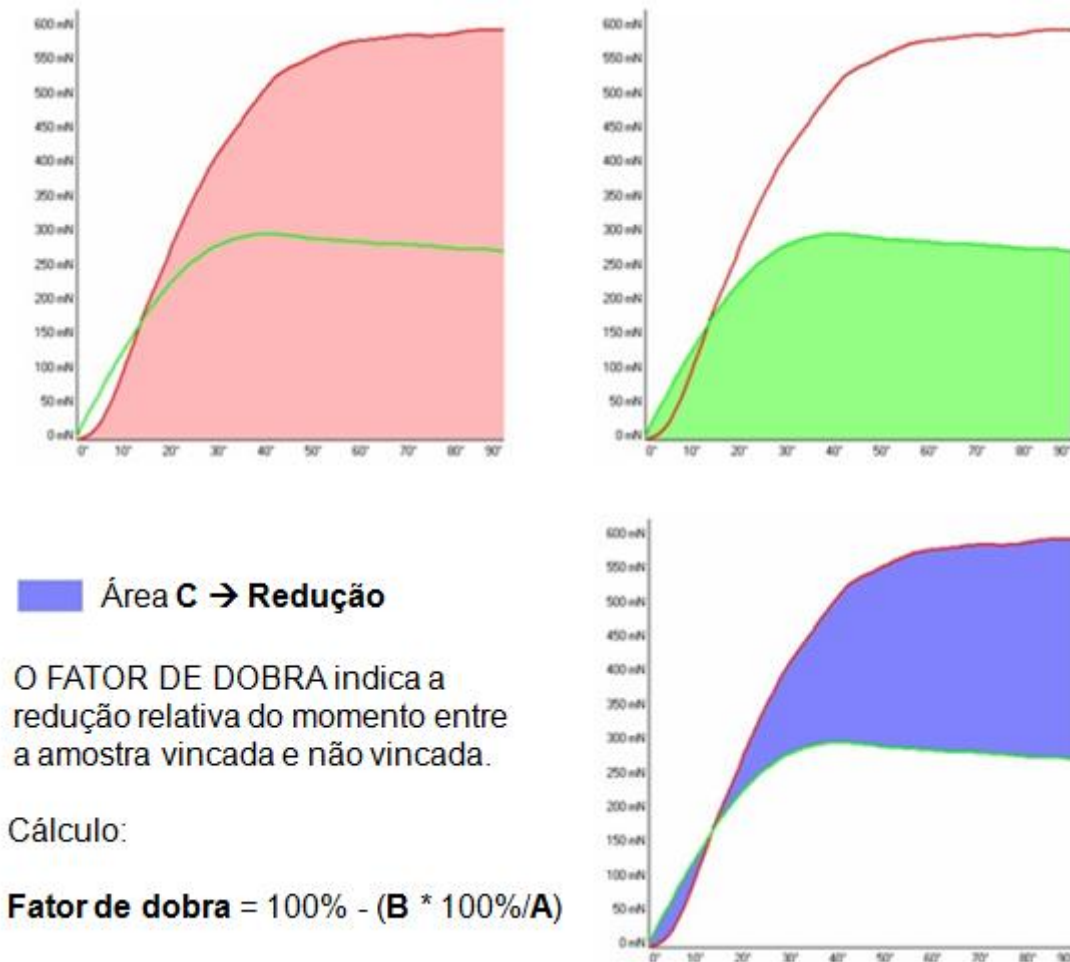


FIGURA 2.17 - CÁLCULO DO FATOR DE DOBRA
 FONTE: MARBACH (2012)

O equipamento registra o momento de flexão da amostra não vencida durante a flexão de 0° a 160°, traçando a curva vermelha da FIGURA 2.16. Na sequência a amostra vencida é introduzida e o equipamento registra o momento de flexão traçando a curva verde da FIGURA 2.16.

A área A abaixo da curva da amostra não vencida e a área B abaixo da curva da amostra vencida possibilitam o cálculo da área C, que representa a redução relativa do momento de flexão entre a amostra vencida e não vencida, chamada de fator de dobra, conforme FIGURA 2.17.

Vantagens em relação ao equipamento L&W:

- Avaliação de toda a curva das amostras vincadas e não vincadas. Equipamento automático para medição de RCS é limitado a, no máximo, ângulo de 30°;
- Velocidade de teste é maior e mais próxima à realidade industrial: 90°/s. O RCS é medido a 5°/s;
- É possível testar até a ângulos de 160°.

Segundo Mentrasti *et al.* (2013) o mesmo papelcartão pode apresentar comportamento diverso quando flexionado de 0° a 180°, sendo importante avaliar os aspectos cruciais envolvidos em aplicações com manipulação robótica de papelcartão.

2.6.2 Propriedades do papelcartão

As propriedades do papelcartão avaliadas durante o estudo são medidas durante a produção do papelcartão e possuem ampla base de dados.

a. Gramatura

Representa a massa, em gramas, de um metro quadrado de papel ou papelcartão, expressa em g/m². Conforme método TAPPI T 410.

b. Espessura

A espessura de uma folha individual de papel ou cartão é a distância entre duas superfícies planas e paralelas, entre as quais o corpo de prova condicionado está sujeito a uma pressão de 100 ± 10 kPa, expressa em µm. Conforme método TAPPI T 411.

c. Densidade

É o quociente da gramatura pela espessura, expressa em g/cm³. Conforme método TAPPI T 411.

- d. Resistência à flexão (transversal – *CD*, longitudinal – *MD* e geométrica – *GM*)
Resistência à flexão é o momento de flexão necessário para flexionar 15 graus de sua linha central, a extremidade livre de uma amostra de 38,1 mm de largura, quando uma carga é aplicada 50 mm abaixo do seu ponto de fixação. Expressa em mN. Conforme método TAPPI T 566.
Importância: resistência à flexão correlaciona-se com o desempenho durante o transporte, conversão, armazenagem e o manuseio da embalagem final.
- e. Tração longitudinal e tração transversal
É a força máxima desenvolvida por unidade de largura da amostra antes da ruptura. Expressa em kN/m. Conforme método TAPPI T 494.
- f. Elongação longitudinal e elongação transversal
É o estiramento máximo ocorrido em uma amostra antes da ruptura, durante o teste de tração. Expressa em %. Conforme método TAPPI T 494.
- g. *Ply Bond*
Segundo Fellers, Östlund e Mäkela (2012) o teste de *Ply Bond* é o mais utilizado para quantificar a resistência à delaminação de papel e cartão. Uma amostra é colada de ambos os lados por meio de uma fita adesiva “dupla face”, em seguida é prensada contra uma armação metálica que recebe um impacto paralelo à superfície do papel por meio de um pêndulo posicionado em ângulo de 90°. Este impacto resulta em delaminação do papelcartão no ponto mais fraco, entre a superfície superior e inferior do corpo de prova. Expresso em J/m². Conforme método TAPPI T 569 om-14.
- h. *ZDT* (Z - Direction Tensile Strength)
Ensaio físico para determinação da resistência interna do cartão na direção Z. Para realização do teste aplica-se fita dupla face em ambos os lados do papelcartão, colocando-o entre dois pratos sob pressão especificada. Aplica-se tensão uniforme na direção perpendicular ao plano da amostra até que haja separação das camadas. Expresso em kPa. Conforme método TAPPI T 541.

i. Ângulo de delaminação

Ensaio físico para determinação do ângulo de delaminação do cartão. O papelcartão é afixado a uma plataforma elevatória e a um cilindro metálico por meio de fita dupla face. Aumenta-se gradativamente o ângulo de inclinação da plataforma de tal forma que o cilindro tracione a amostra e ocorra a delaminação do papelcartão. Anota-se o ângulo em graus. Método desenvolvido pela Tetra Pak.

j. SCT (Short Compression Strength)

Ensaio físico para determinação da resistência do papelcartão à compressão, a fim de fornecer referência quanto à resistência do material a ser empregado em caixas e recipientes. Expresso em kN/m. Conforme método TAPPI T 823.

k. Umidade

O conteúdo de umidade de um material é usualmente expresso como uma porcentagem do peso do material seco. Conforme método TAPPI T 412 om-11.

2.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA

2.7.1 Cp e Cpk

Em um processo sob controle, o característico de qualidade do conjunto dos dados possui distribuição normal. Quando a variabilidade se torna anormal, as amostras indicarão que o processo se modificou e ficou fora dos controles. O processo sob controle não possui ponto fora dos limites. O objetivo do controle estatístico é alcançar um processo tanto sob controle como dentro das tolerâncias. Uma forma de verificar se o objetivo está sendo alcançado é através do uso do Coeficiente de Capabilidade de Processo (Cp) (RUTHES et al., 2006).

O índice Cp apenas considera a variabilidade do processo. Com o intuito de analisar o processo considerando-se a centralização dos dados, criou-se o índice Cpk.

O Cpk foi criado com o objetivo de medir a distância entre o limite de especificação mais próxima do valor esperado a partir da característica de qualidade estudada, de modo a relacionar a metade desta distância da amplitude do processo natural, 3σ . De um ponto de vista prático, o índice Cpk é mais avançado do que o Cp, porque pode ser utilizado para medir as características de qualidade, onde apenas um limite de especificação é importante.

O ideal é que o Cpk seja maior que 1 sendo que tipicamente é desejado o valor de 1,33 na maioria das indústrias.

O cálculo do Cp e Cpk aplicado neste trabalho visa avaliar a variabilidade dos dados obtidos e o atendimento das especificações.

2.7.2 Diagrama de caixa ou *boxplot*

O diagrama de caixa, ou *boxplot* é um gráfico no qual o eixo vertical representa a variável a ser analisada e o eixo horizontal um fator de interesse (NIST, 2012).

O diagrama de caixa é uma ferramenta para localizar e analisar a variação de uma variável dentre diferentes grupos de dados através de uma caixa que representa 50% de todos os valores observados, concentrados na tendência central de valores (NIST, 2012).

Um segmento de reta vertical conecta o topo da caixa ao maior valor observado e outro segmento conecta a base da caixa ao menor valor observado, este segmento denomina-se *Whisker*, ou o fio do bigode conforme FIGURA 2.18 (NIST, 2012). Os dados observados estão representados na forma de uma nuvem dispersa e o *boxplot* à direita demonstra o valor da mediana e os fios do bigode da dispersão.

Tanto a altura da caixa como o tamanho do fio do bigode fornecem informações sobre a dispersão dos dados. Para estimativa do valor mínimo do fio do bigode, toma-se o maior valor entre:

- (a) o menor valor das medidas.
- (b) o valor quartil inferior $-1.5 \times$ altura da caixa.

Para a estimativa do valor máximo do fio do bigode, toma-se o menor valor entre:

- (a) o maior valor das medidas
- (b) o valor do quartil superior mais $1,5 \times$ altura

Os valores atípicos são representados por asterisco (NIST, 2012).

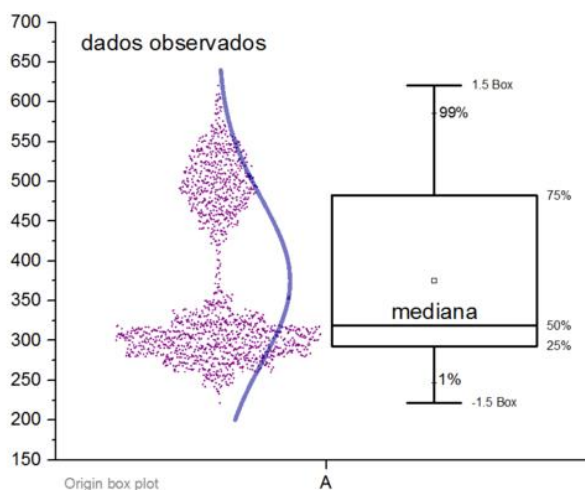


FIGURA 2.18 - DISTRIBUIÇÃO DOS DADOS OBSERVADOS E REPRESENTAÇÃO EM DIAGRAMA DE CAIXA.

2.7.3 p-valor

P-valor corresponde ao menor nível de significância que pode ser assumido para rejeitar a hipótese nula. Dizemos que há significância estatística quando o p-valor é menor que o nível de significância adotado. Por exemplo, quando $p=0,0001$ pode-se dizer que o resultado é bastante significativo, pois este valor é muito inferior aos níveis de significância usuais. Por outro lado, se $p=0,048$ pode haver dúvida pois, embora o valor seja inferior, ele está muito próximo ao nível usual de 5%.

Neste trabalho o valor de $p < 0,05$ foi utilizado como referência para a seleção das variáveis de maior relevância e para validar a correlação entre o *RCS* e as variáveis em estudo.

2.8 CARACTERIZAÇÃO DA QUALIDADE DE VINCAGEM

A utilização de modelos matemáticos construídos com elementos finitos para simular o efeito de vincagem e dobra de papelcartão tem contribuído para entendimento do comportamento de diferentes papéis com estratégias de produção e propriedades físicas diversas.

Huang (2014) avaliou o comportamento de vinco e dobra de três cartões comerciais de diferentes fabricantes e demonstrou que a avaliação do perfil de cisalhamento ao longo da espessura do cartão, a densidade e a resistência à tração de cada camada do papelcartão são suficientes para prever o comportamento durante o processo de vinco e dobra.

Ao invés de assumir propriedades uniformes em cada camada utilizou-se o perfil de força de cisalhamento para mapear as propriedades medidas na direção da espessura.

Os estudos de Huang (2014) demonstraram que a resistência da interface influencia principalmente o comportamento da dobra, ao passo que as propriedades da camada afetam a força necessária para vincagem.

No papelcartão as propriedades de interface representam a adesão entre as camadas. Isto pode ser controlado durante a produção alterando-se o teor seco entre camadas ou adicionando-se químicos, como amido entre as mesmas.

O modelo simulou a força de interface com fator $\frac{1}{2}$, 1 e 2 com relação à medida original a fim de avaliar o comportamento do vinco e dobra com diferentes níveis de força de interface.

Os resultados de vincagem não foram afetados significativamente pelas forças de interface, porém diferentes forças de interface influenciam a simulação de dobra significativamente.

Durante a dobra é importante que ocorra flexão na região vincada, que ocorre mais facilmente se houver redução do momento de dobra e que este seja significativamente menor que do papel não vincado.

Na simulação de dobra os momentos de flexão máximos foram plotados em função da profundidade de vinco. Foi observado que as forças de interface possuem impacto sobre o momento de dobra, independentemente do formato do perfil de força de cisalhamento. Para todos os papéis verificou-se que o dobro de força de cisalhamento resulta em maiores momentos de dobra, e a metade de força de cisalhamento resulta em menores momentos de dobra do que os dados medidos na amostra original.

Isto se deve ao fato de que menor delaminação ocorre nas interfaces quando a força de cisalhamento é maior.

Para ótima performance de dobra torna-se importante reduzir a força de interface a fim de reduzir o momento de dobra no MD e CD. Altas forças de interface requerem vincos mais profundos para alcançar a mesma delaminação entre as interfaces, podendo gerar trincas.

A modelagem matemática precisa do comportamento do vinco é um fator chave para o *design* e simulação do processo de formação da embalagem. Há literatura abundante sobre modelagem constitutiva capaz de capturar o comportamento complexo do papelcartão (XIA, 2002; STENBERG, 2002; MAKELA e ÖSTLUND, 2003; GIAMPIERI *et al.*, 2011; BEECH e PEERLINGS, 2000). Entre eles têm-se modelos que avaliam o papelcartão como um todo e também a interface entre as diversas camadas.

Os modelos constitutivos anisotrópicos elasto-plásticos para papelcartão necessitam de muitos parâmetros do material (entre dez a quarenta), os quais podem representar um desafio para medição com os métodos tradicionais.

Um dos primeiros modelos é atribuído a Xia (2002). O modelo consiste de duas partes, um modelo contínuo que captura o comportamento no plano do papelcartão e um modelo para as interfaces internas que captura a resposta fora do plano. Uma das limitações refere-se à arbitrariedade das interfaces e a segunda é a definição de onde a delaminação deve ocorrer. A terceira limitação está relacionada à calibração, que requer parâmetros experimentalmente definidos.

Beex e Perlings (2009) concluíram que a plasticidade do papelcartão é importante para uma boa vincagem. Um modelo simplificado foi proposto baseado no critério de Hill, disponível em *softwares* comerciais.

Analogamente Huang *et al.* (2014) utilizaram o software ABAQUS para modelar zonas de coesão superficiais para as interfaces a fim de demonstrar que o mapeamento das propriedades ao longo da espessura podem prever o comportamento da delaminação interna do papelcartão obtida experimentalmente.

Estes modelos são úteis na investigação de fenômenos em macro e micro escala do comportamento do papelcartão, entretanto requerem esforço computacional significativo.

Este trabalho visa correlacionar propriedades do papelcartão comumente avaliadas durante a produção na indústria com o desempenho nos processos de vincagem e dobra. Um amplo banco de dados industrial de controle de qualidade da produção de papelcartão bem como dados de controle de qualidade da vincagem foi avaliado em busca das principais propriedades e parâmetros que impactam o processo.

A literatura é escassa em análises que envolvam dados obtidos da indústria, muitas vezes limitada a um número restrito de amostras vincadas e dobradas em equipamentos estáticos de laboratório. Neste estudo mais de 27.000 medições de vincos foram realizadas em papelcartão produzido ao longo de dezenove meses, contemplando um vasto e representativo banco de dados, além da realização de testes industriais focados para confirmação de hipóteses levantadas durante avaliação de desempenho das variáveis.

3 OBJETIVO GERAL E OBJETIVOS ESPECÍFICOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Identificar quais propriedades físicas e parâmetros de processo possuem maior influência no processo de vincagem e conseqüentemente no resultado de RCS.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para atingir o objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar o banco de dados de medição de RCS e correlacionar as variáveis de processo e propriedades físicas através de análise estatística;
- Avaliar o comportamento do RCS e profundidade de vinco ao longo do perfil transversal e longitudinal da bobina, com o objetivo de identificar possíveis anomalias durante a vincagem;
- Confirmar a aplicabilidade do teste de RCS para o papelcartão em estudo, através da análise individual do momento de flexão do papelcartão e do vinco, análise do ângulo de momento máximo e comparativo de medição do momento de flexão conforme método TAPPI T 556 e método para determinação de RCS;
- Realizar teste industrial com a propriedade física de maior impacto sobre a vincagem como variante para confirmação da hipótese;
- Comparar o desempenho em RCS do papelcartão da MP-7 e da MP-9;
- Comparar a estrutura da área vincada e dobrada de amostras com valores de RCS através da análise de microtomografia de raios X.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 MATERIAL E CONDUÇÃO EXPERIMENTAL

As amostras de papelcartão impresso e vincado foram obtidas diretamente de uma empresa de embalagens para líquidos. Estas amostras foram rastreadas e o lote de produção identificado, possibilitando o levantamento de dados do papelcartão virgem que deram origem ao estudo.

O produto CLC/C Duplex 80 mN produzido na máquina de papel 7 (MP-7) da Klabin foi escolhido como foco para o estudo por se tratar do cartão com maiores dificuldades em atender a especificação de *RCS*.

A coleta de amostras foi realizada durante o processo de impressão e vincagem no período de janeiro de 2011 a Agosto de 2012. Estas amostras possuíam data de fabricação do papel virgem de outubro de 2010 a junho de 2012.

As medições de *RCS* foram conduzidas no laboratório da empresa de embalagens para líquidos e as medições das propriedades físicas do papelcartão virgem (gramatura, espessura, densidade, resistência à flexão, resistência à tração, alongação, *Ply Bond*, ZDT, ângulo de delaminação, SCT e umidade) e profundidade de vinco foram conduzidas no Laboratório de Testes Físicos da Klabin S.A. em Telêmaco Borba - Paraná.

4.2 AVALIAÇÃO DOS DADOS

Os dados foram avaliados de duas formas: ordenados de acordo com a data de fabricação, a fim de avaliar possíveis alterações no processo de fabricação de papel e ordenados de acordo com a data de impressão e vinco no cliente, a fim de avaliar possíveis alterações no processo de vincagem.

A análise estatística dos dados foi realizada com apoio do software Minitab®

4.3 AVALIAÇÃO DA CAPABILIDADE DO PROCESSO

Com a utilização do software Minitab® 16 calculou-se os índices de capacidade do processo Cp e Cpk do *RCS CD* e *RCS MD* medidos com o objetivo de avaliar o atendimento das especificações e avaliar a distribuição dos dados através de histogramas.

4.4 MEDIÇÃO DE RELATIVE CREASE STRENGTH - RCS

A medição de *RCS* é realizada em equipamento automático de medição de resistência à flexão da Lorentz & Wettre. O controle de qualidade durante impressão/vincagem é baseado nas medições de *RCS* em amostras coletadas nas faixas 1, 4 e 7 no sentido transversal (*CD*) da bobina. Para cada faixa são coletadas amostras das seis placas que compõem a circunferência dos cilindros vincadores no sentido longitudinal (*MD*) da bobina. Cada quadro na FIGURA 4.1 representa uma embalagem.

A especificação de *RCS* para o cartão impresso é nominal/mínimo/máximo= 60%/ 55%/ 65%.

Após a laminação a especificação passa a ser nominal/mínimo/máximo= 85%/ 80%/ 90%.

As amostras são cortadas em tiras de 25 mm de largura para o produto em estudo.

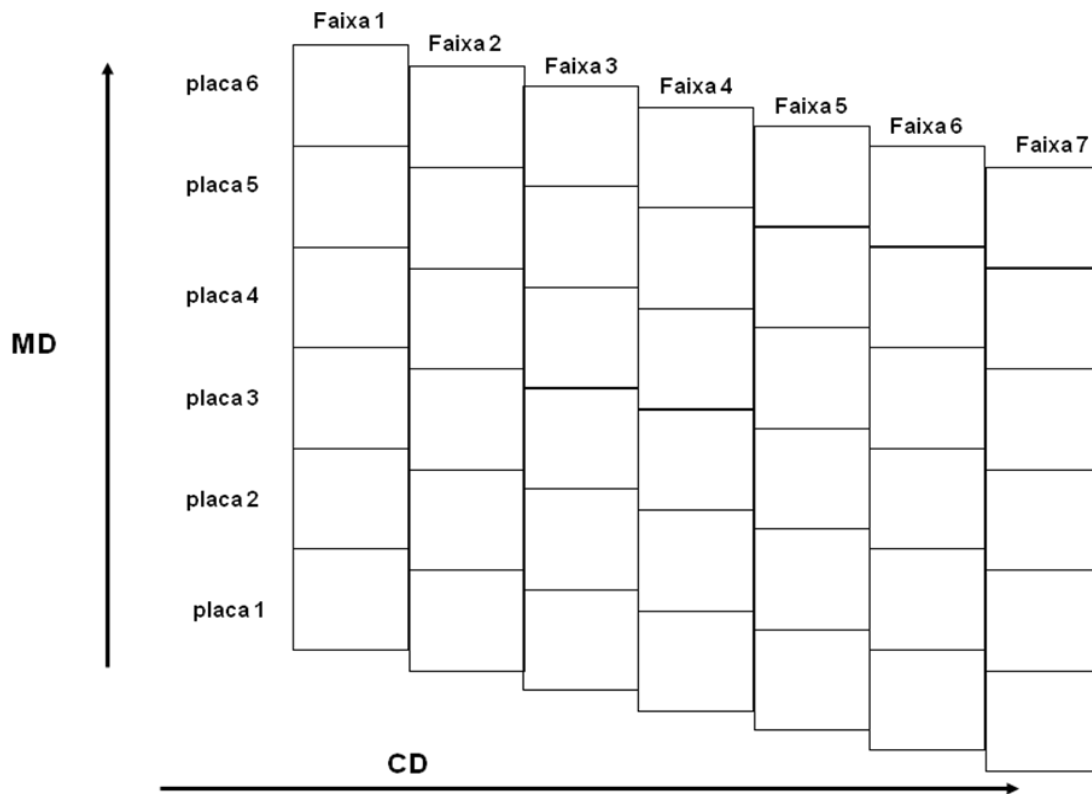


FIGURA 4.1- ESQUEMA DE PLACAS E FAIXAS DO MATERIAL IMPRESSO E VINCADO.
FONTE: O AUTOR (2012)

Para cada embalagem têm-se quatro medições de *RCS MD* e quatro medições de *RCS CD* conforme FIGURA 4.2.

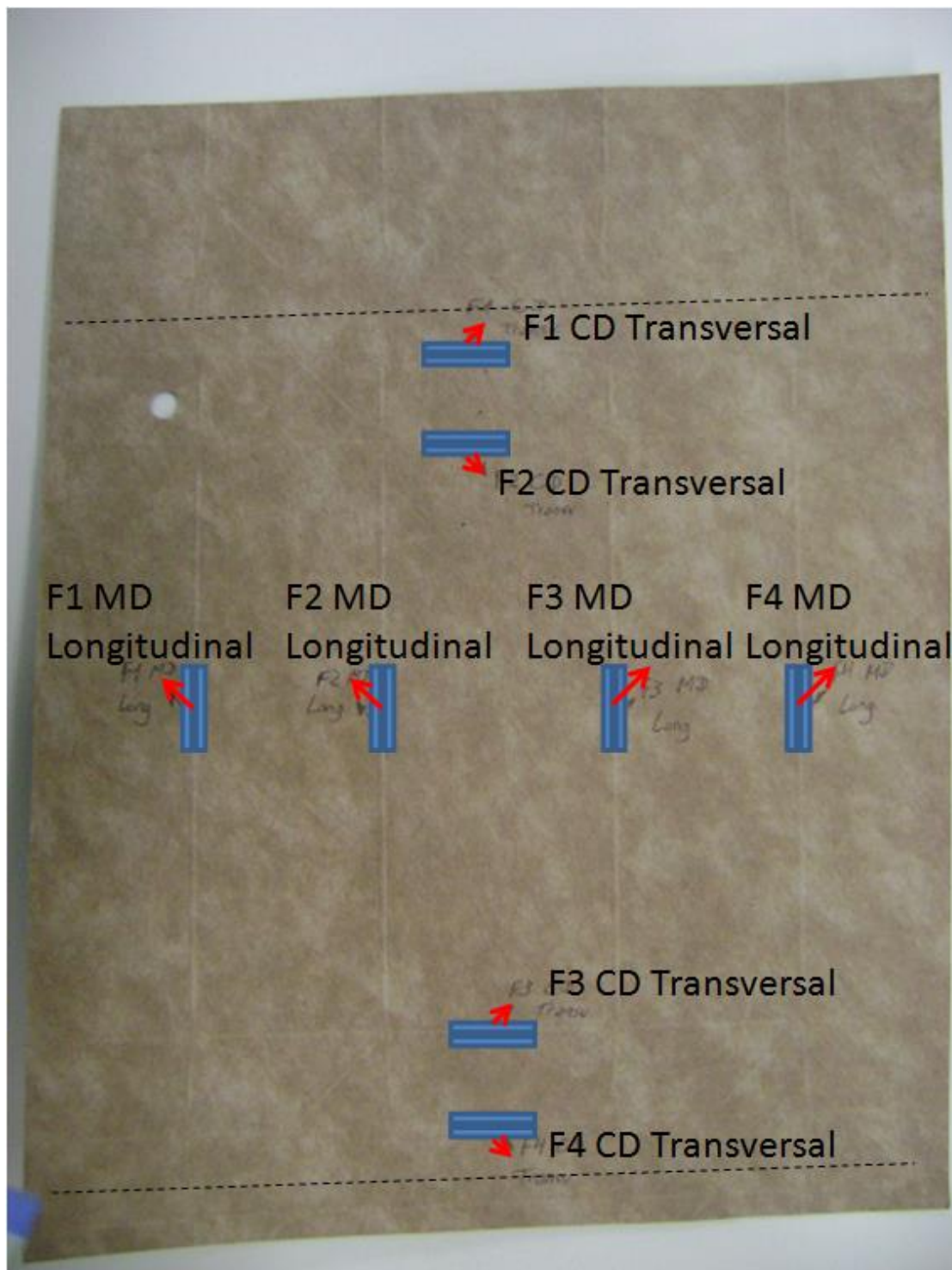


FIGURA 4.2 - VINCOS E INDICAÇÃO DA ÁREA DE MEDIÇÃO DO CARTÃO NÃO VINCADO PARA CÁLCULO DO RCS. FONTE: O AUTOR (2013)

As amostras cortadas no sentido longitudinal (MD) da embalagem impressa possuem os vincos transversais (CD) da embalagem, a partir do qual calcula-se o RCS CD (FIGURA 4.3).

As amostras cortadas no sentido transversal (*CD*) da embalagem impressa possuem os vincos longitudinais (*MD*) da embalagem, a partir do qual calcula-se o *RCS MD* (FIGURA 4.3).

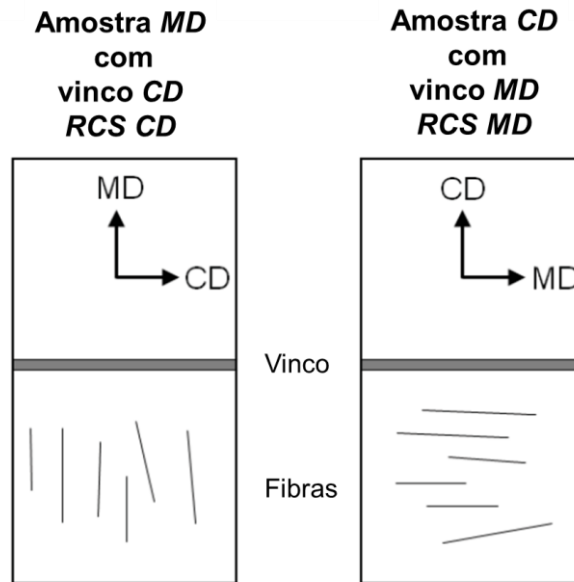


FIGURA 4.3 - AMOSTRAS COM VINCOS CD E MD, RESPECTIVAMENTE.
FONTE: SEBES (2010)

A base de dados foi composta por medições de *RCS* em todos os vincos, sendo quatro vincos transversais e quatro vincos longitudinais. Para cada vinco realiza-se a medição do momento de flexão do cartão na área não vincada subjacente.

- Número de bobinas analisadas: 157
- Número de faixas analisadas: 566
- Número de medições de *RCS MD*: 3.396 (nº de faixas x 6 placas vincadoras)
- Número de medições de *RCS CD*: 3.396 (nº de faixas x 6 placas vincadoras)
- Cartão fora do vinco: Número de medições de momento de flexão *MD* e *CD*: 27.168 (*RCS* x 8 (nº de linhas de vinco))
- Vincos: *MD* e *CD*: Medições de momento de flexão: 27.168

4.4.1 Análise das medições individuais de momento de flexão do papelcartão e do vinco

Para melhor entendimento dos dados, as medições individuais do papelcartão e do vinco foram avaliados em conjunto no mesmo gráfico, juntamente com os valores de *RCS*. Esta é a primeira vez que os dados de momento de flexão do vinco e do cartão são avaliados individualmente, de forma a possibilitar a visualização do comportamento dos dados que geram o resultado final *RCS*.

4.4.2 Comparativo de medição de momento de flexão: TAPPI T 556 e método para determinação de *RCS*

Propôs-se um comparativo de medição do momento de flexão a 15°, com distância de 50 mm, conforme o método TAPPI T 556 e o momento de flexão a 30°, com distância de 10 mm conforme método para determinação de *RCS* com o objetivo de avaliar as variações do momento de flexão do papelcartão na área não vincada.

O método TAPPI T 556 é aplicado nas medições de o momento de flexão do papelcartão realizadas durante a rotina de controle de qualidade da produção. A dimensão do corpo de prova é 38 x 80 mm e o comprimento de teste é de 50 mm (TRYDING, 2012). FIGURA 4.4.

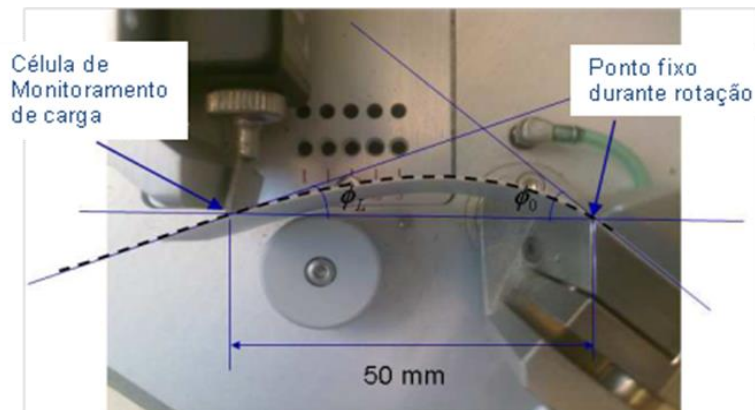


FIGURA 4.4 - DETERMINAÇÃO DE MOMENTO DE FLEXÃO EM EQUIPAMENTO L&W DE ACORDO COM MÉTODO TAPPI T 556.
 FONTE: TRYDING (2012)

O comparativo foi realizado em um rolo jumbo de CLC/C Duplex 80 mN da MP-7, dividido em 24 setores para análise de momento de flexão a 15° e 50 mm de acordo com o método TAPPI T 556 e a 30° , 10 mm em cada setor de acordo com o método para determinação de RCS.

4.4.3 Avaliação do ângulo de máximo momento

A fim de avaliar o ângulo de máximo momento do papelcartão em estudo, utilizou-se o mesmo equipamento para medição do momento de flexão até 30° de acordo com o método para cálculo de RCS, programando-o para realizar medições até 90° .

O momento é registrado durante a dobra e os dados transferidos para uma planilha pelo software específico do equipamento. FIGURA 4.5.

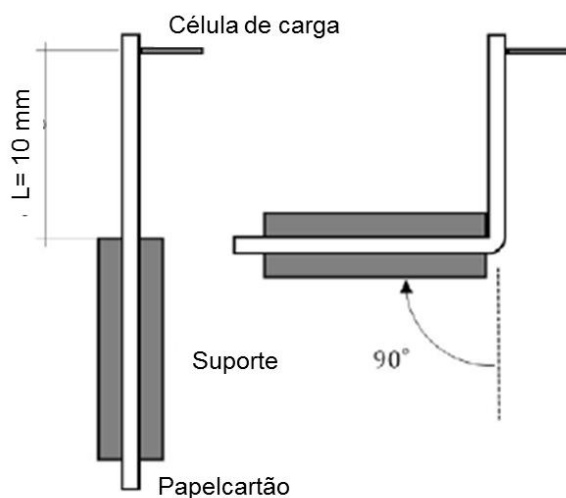


FIGURA 4.5 - DETERMINAÇÃO DE MOMENTO DE DOBRA EM EQUIPAMENTO L&W.

4.4.4 Avaliação do comportamento do RCS e profundidade de vinco ao longo do perfil transversal da bobina

O perfil transversal da bobina é dividido em faixas de impressão conhecidas como 'web'. Cada faixa corresponde à largura de uma embalagem.

Os dados de RCS foram organizados em faixas e comparados às medições de profundidade de vinco para permitir avaliar possíveis variações ao longo do perfil transversal, que podem estar associados a problemas de ajuste no vincador.

A profundidade de vinco foi medida com aparelho analisador de superfície por contato Talysurf da Taylor Hobson (Apêndice).

4.4.5 Avaliação do comportamento do RCS e profundidade de vinco ao longo do perfil longitudinal da bobina

O perfil longitudinal da bobina é vincado por seis placas vincadoras individuais montadas sobre um cilindro. As placas vincadoras são conhecidas por "creasing plates". Os dados de RCS foram organizados por placa vincadora e comparados às

medições de profundidade de vinco para permitir avaliar possíveis variações ao longo do perfil longitudinal de uma revolução completa do cilindro vencedor.

4.4.6 Investigação das propriedades físicas do papelcartão e sua influência no comportamento do RCS

A fim de avaliar o impacto das propriedades físicas do papelcartão no comportamento do RCS a base de dados foi subdividida em faixas.

Faixa 1: $RCS\ CD < 0,60$

Faixa 2: $0,60 \leq RCS\ CD < 0,65$

Faixa 3: $0,65 \leq RCS\ CD < 0,70$

Faixa 4: $RCS\ CD \geq 0,70$

O resultado das propriedades físicas foi então avaliado para cada faixa.

4.4.7 Avaliação de desempenho das variáveis

Aplicada regressão linear a fim de investigar e modelar a relação entre a variável resposta e as variáveis preditoras através do método dos mínimos quadrados ordinários (MQO), que procura encontrar o melhor ajuste para um conjunto de dados tentando minimizar a soma dos quadrados das diferenças entre o valor estimado e os dados observados (tais diferenças são chamadas resíduos).

Utilizou-se a função regressão do Minitab® 16 para a análise.

O Minitab® 16 também disponibiliza a ferramenta *Best subsets regression* que identifica uma série de modelos em busca do maior R^2 entre todas as variáveis preditoras especificadas. Esta ferramenta proporciona uma forma eficiente de identificar modelos com o menor número possível de variáveis preditoras e foi aplicado na avaliação da base de dados.

A partir da variável que apresentou maior correlação com o RCS um teste industrial foi proposto para validação do modelo.

4.4.8 Teste industrial com papelcartão produzido na Máquina de papel 7 (MP-7) e Máquina de papel 9 (MP-9)

Em 2013 foi instalado um novo vincador composto de nove faixas de impressão e vinco. Nesta oportunidade uma bobina da máquina de papel 7, com alto *Ply Bond* 271 J/m² e uma bobina da máquina de papel 9, com *Ply Bond* próximo ao nominal 211 J/m², foram selecionadas para impressão e vincagem para comparação de RCS e atendimento das especificações. O critério de seleção destas bobinas foi baseado no fato de que a propriedade *Ply Bond* apresentou a maior correlação com o RCS na análise estatística.

A especificação de *Ply Bond* é nominal/mínimo/máximo= 200/ 140/ 320 J/m².

4.5 AVALIAÇÃO EM MICROTOMÓGRAFO DE RAIOS X

Análises de microtomografia computadorizada de raios X foram realizadas com o objetivo de investigar a estrutura da área vincada e dobrada em busca de diferenças que possam explicar o comportamento em relação aos resultados de RCS.

O corte da amostra de papelcartão com instrumentos de corte como tesoura, faca ou bisturi provoca esmagamento das camadas internas, alterando fisicamente a estrutura das fibras e impossibilitando a visualização da área de interesse em sua forma original. A microtomografia computadorizada de raios X apresenta a vantagem de dispensar o corte da amostra, permitindo uma avaliação fiel do estado da delaminação do papelcartão na área do vinco após a dobra.

O equipamento pertencente ao LAMIR – Laboratório de Minerais e Rochas da UFPR é da marca Skyscan 1172.

Parâmetros utilizados:

- Análise em 360°, sem filtro
- 0,25°/step

- Voltagem do Raio X: 89 kV
- Corrente do Raio X: 112 μ A
- Tamanho do pixel: 1,87 μ m
- Tempo de análise de cada amostra: 1h15

Os parâmetros quantitativos analisados foram:

- Volume de interesse total
- Volume do objeto
- Percentual do volume do objeto
- Superfície do volume de interesse total
- Superfície do objeto
- Superfície de intersecção
- Superfície do objeto/volume do objeto
- Densidade da superfície do objeto
- Índice de convexidade da superfície
- Razão percentual do volume de poros dividido pelo volume total dentro da região de interesse

A avaliação foi realizada para uma binarização de 0-49 tons de cinza, que corresponde a fase de poros e uma binarização de 49-255 que refere-se a fase do papel. O objetivo é avaliar o volume da fase de poros em relação ao volume total da amostra dentro da região de interesse. Como a amostra é irregular, e uma amostra pode não ser do mesmo tamanho que a outra, mesmo que a diferença seja em escala microscópica, o valor percentual é o mais indicado para a análise.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 ANÁLISE DE RCS

5.1.1 Ordenação dos dados de acordo com a data de produção do papelcartão e de acordo com a data de vincagem

A primeira avaliação foi realizada após ordenar os dados de acordo com a produção temporal dos rolos, a fim de avaliar possível alteração no processo e comparar com os dados ordenados de acordo com a vincagem, para também avaliar possível alteração do processo de conversão.

Na FIGURA 5.1 os dados de *RCS CD* foram ordenados de acordo com a data de fabricação. Na FIGURA 5.2 os dados de *RCS CD* ordenados de acordo com a data de vincagem.

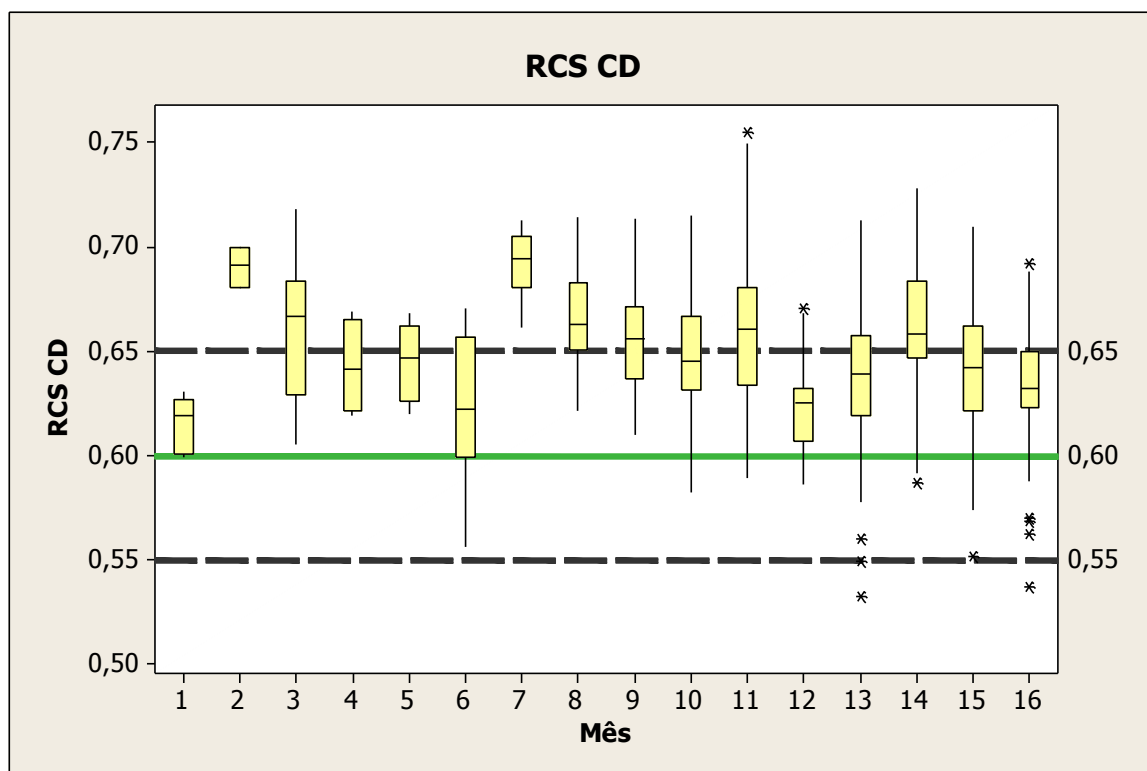


FIGURA 5.1 - DADOS DE RCS CD ORDENADOS DE ACORDO COM DATA DE PRODUÇÃO DO PAPELCARTÃO

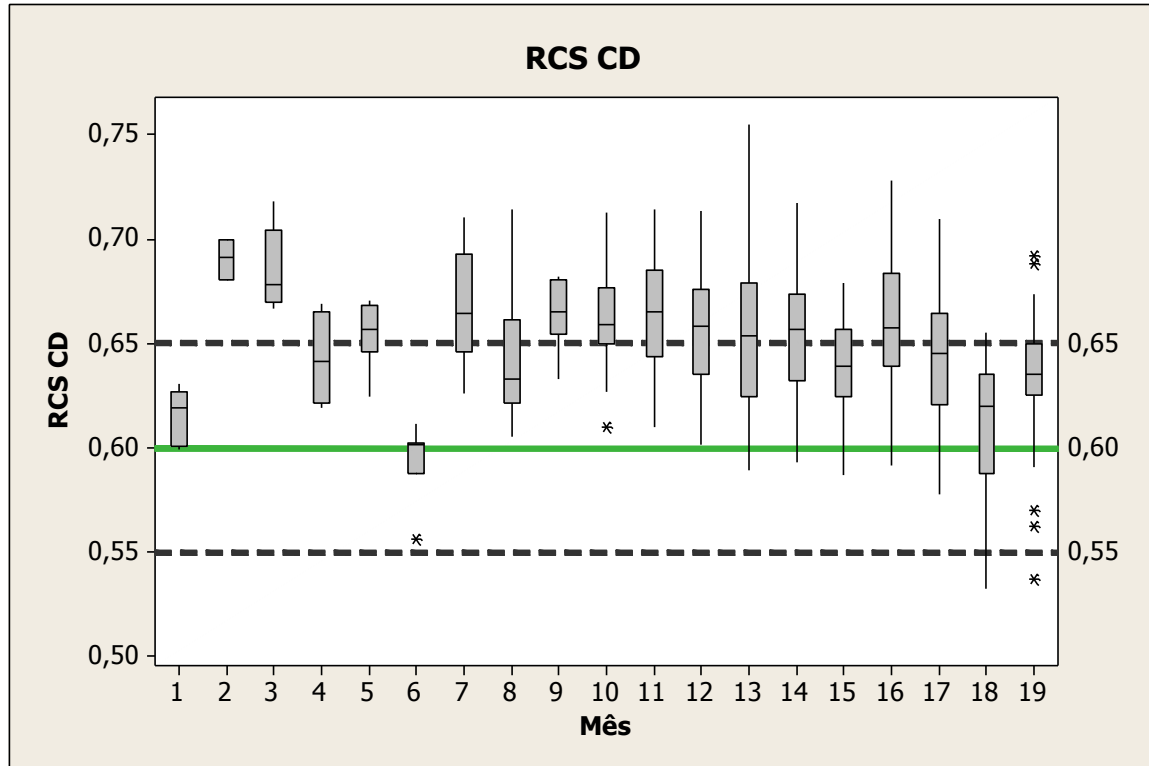


FIGURA 5.2 - DADOS DE RCS CD ORDENADOS DE ACORDO COM A DATA DE VINCAGEM.
 FONTE: O AUTOR (2013)

Na FIGURA 5.3 os dados de *RCS MD* foram ordenados de acordo com a data de fabricação. Já na FIGURA 5.4 os dados de *RCS MD*, ordenados de acordo com a data de vincagem.

Como pode ser notado os dados de RCS MD e CD das FIGURAS 5.1 a 5.4 apresentam grande variabilidade, que pode estar relacionada a oscilações das propriedades físicas do papelcartão, como umidade, espessura entre outras, bem como parâmetros de vincagem como profundidade de vinco.

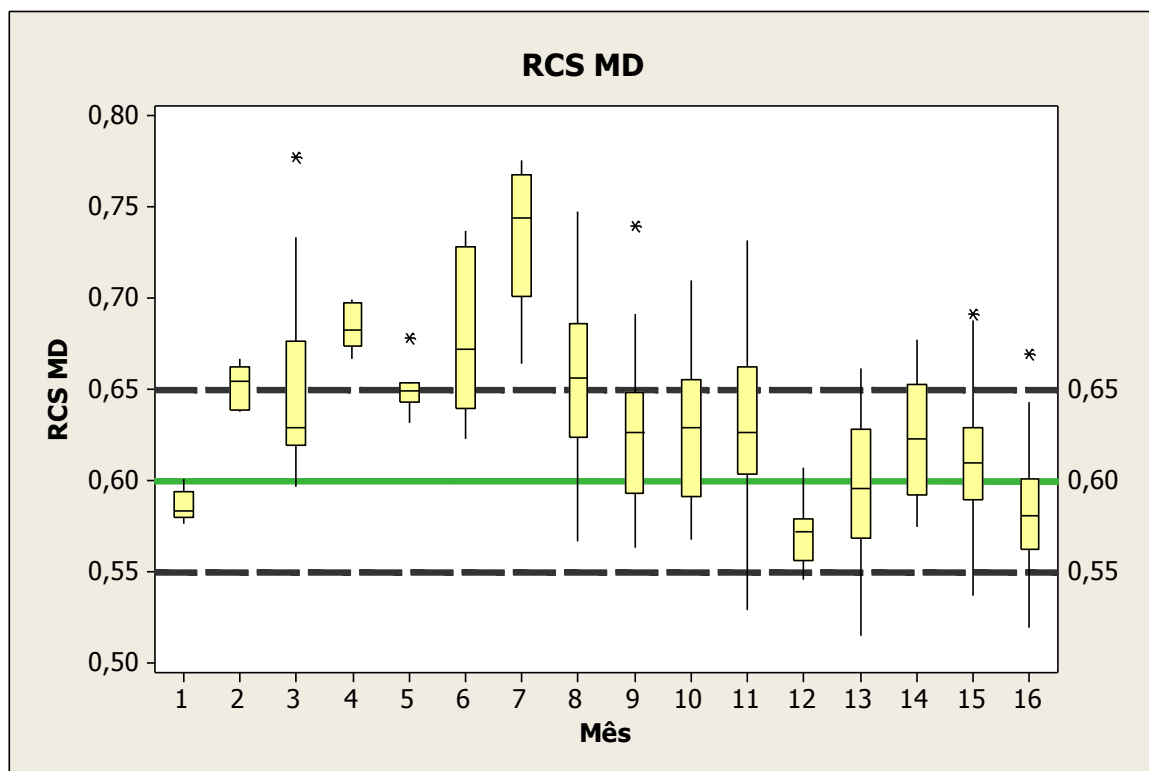


FIGURA 5.3 - DADOS DE RCS MD ORDENADOS DE ACORDO COM A DATA DE FABRICAÇÃO DO PAPELCARTÃO

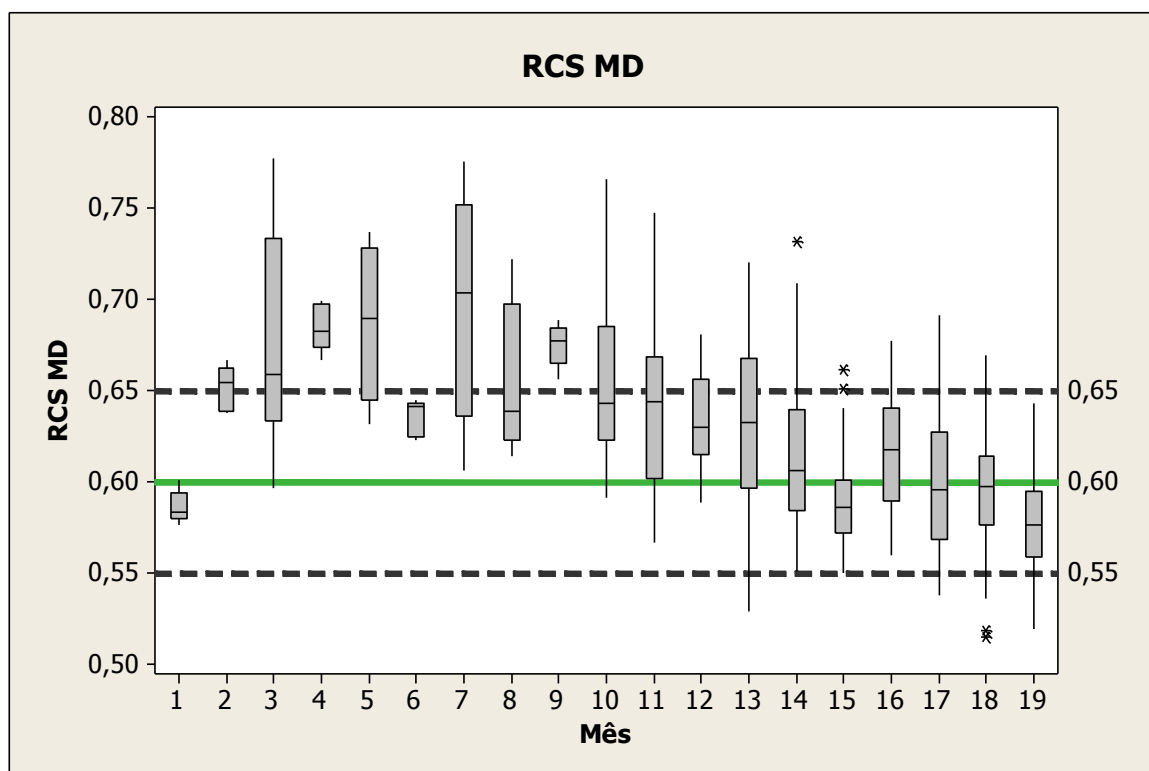


FIGURA 5.4 - DADOS DE RCS MD ORDENADOS DE ACORDO COM A DATA DE VINCAGEM.

5.1.2 Capacidade do processo

Nas Figuras 5.5 e 5.6 é possível observar que:

- O valor médio do *RCS CD* (0,65) é maior que o valor médio do *RCS MD* (0,62). *RCS CD* apresenta baixo *Cpk*. Mais de 50% dos dados acima da especificação.

- *RCS MD* apresenta valor médio menor que *RCS CD*, porém com maior variabilidade.

Esta mesma observação foi relatada por Sebes (2010). Em seus experimentos evidenciou que o *RCS* é menor nos vincos longitudinais do que nos vincos transversais, embora a diferença seja em algumas vezes muito pequena.

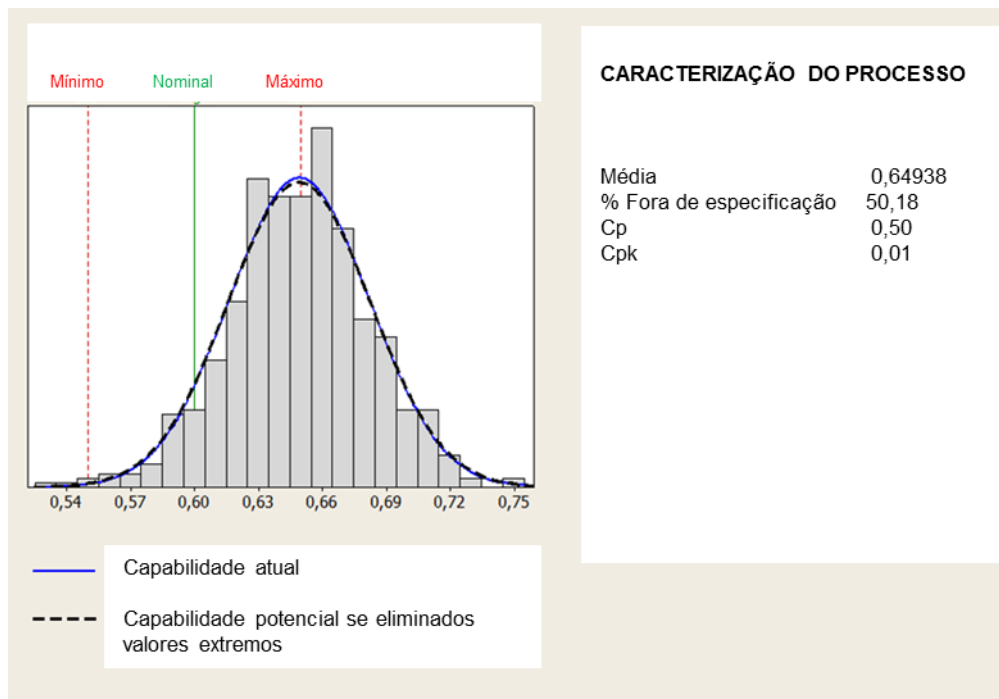


FIGURA 5.5 - CAPABILIDADE DO RCS CD

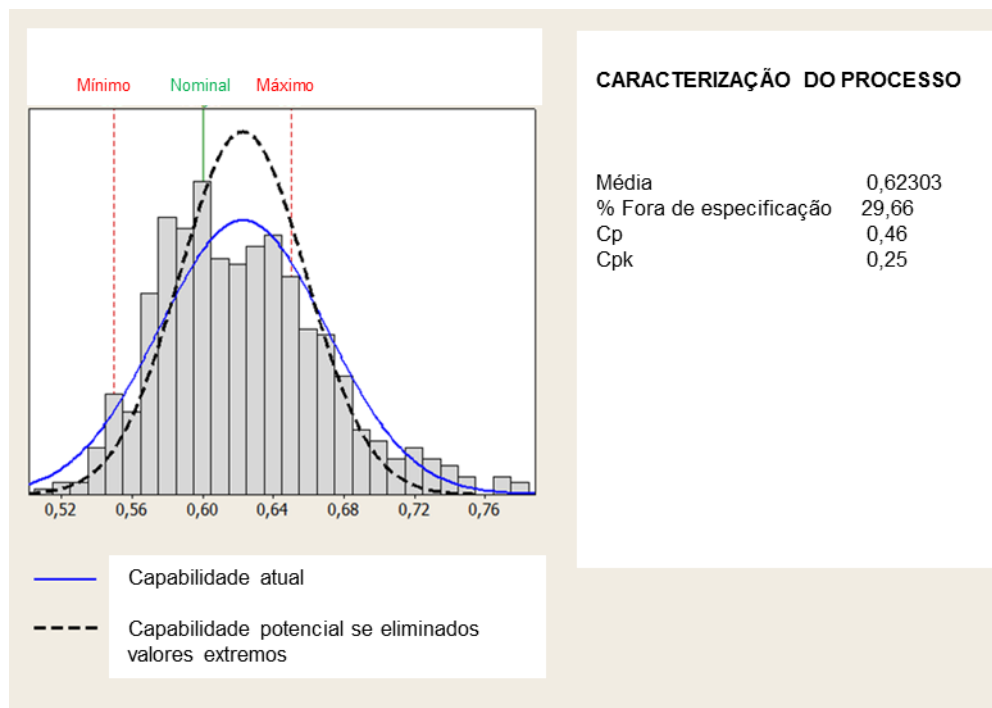


FIGURA 5.6 - CAPABILIDADE DO RCS MD

5.1.3 Análise das medições individuais de momento de flexão do papelcartão e do vinco

Na FIGURA 5.7 as medições individuais do papelcartão e do vinco foram inseridos no mesmo gráfico, juntamente com os valores de *RCS*. Os dados estão ordenados de acordo com a data de produção do papelcartão e é possível observar pontualmente os maiores valores de *RCS* no período final do acompanhamento em destaque. Importante notar que em dois momentos o *RCS* ficou mais alto, em datas diferentes de produção.

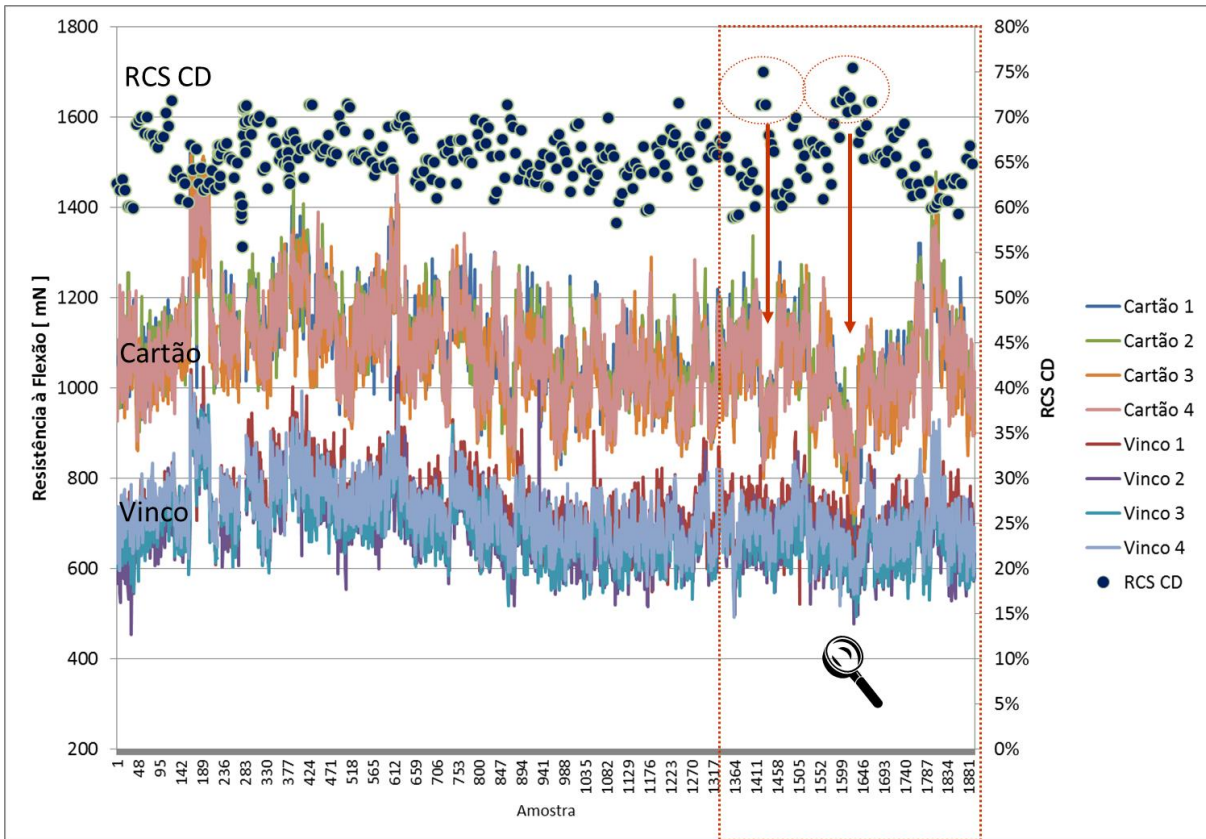


FIGURA 5.7 - VALORES PONTUAIS DE RCS MAIS ALTOS NO PERÍODO EM DESTAQUE.
 FONTE: O AUTOR (2013)

A FIGURA 5.8 apresenta os dados focados apenas no período final do acompanhamento. Observa-se que nos dois momentos em que o *RCS* esteve mais alto houve redução significativa do momento de flexão do cartão (área não vincada). O momento de flexão do vinco permaneceu no mesmo patamar.

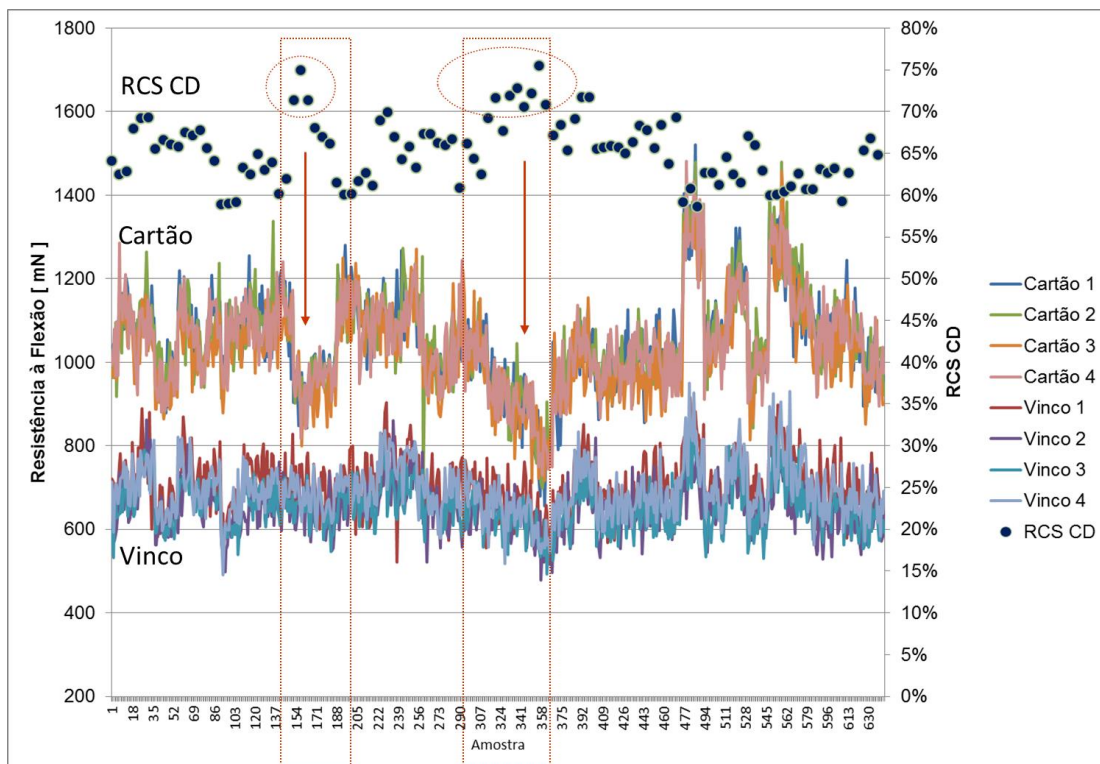


FIGURA 5.8 - RCS MAIS ALTO EM DUAS DATAS DE PRODUÇÃO COM REDUÇÃO DO MOMENTO DE FLEXÃO DO CARTÃO (ÁREA NÃO VINCADA) COMPARATIVAMENTE AO MOMENTO DE FLEXÃO DO VINCO.

FONTE: O AUTOR (2013)

Aplicando a mesma análise nas amostras que apresentaram menores valores de RCS (FIGURA 5.9) observa-se o comportamento contrário: maiores valores de momento de flexão do cartão e momento de flexão do vinco mais estável.

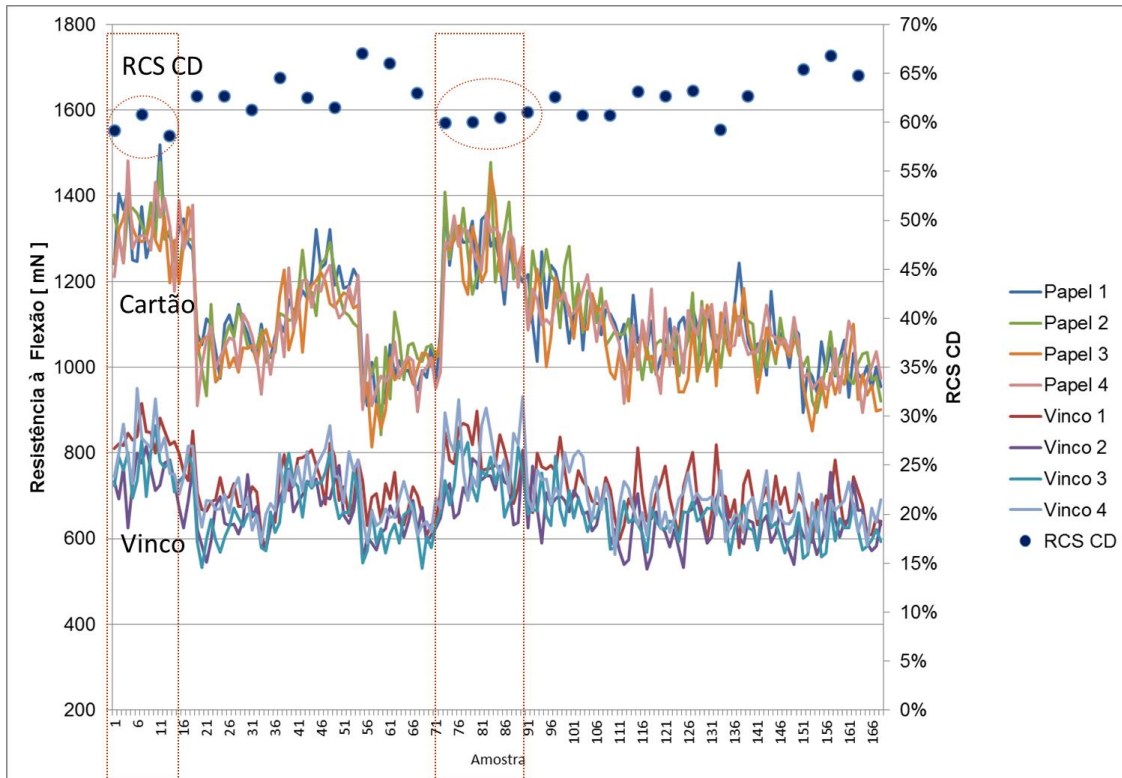


FIGURA 5.9 - RCS MAIS BAIXO EM DUAS DATAS DE PRODUÇÃO COM AUMENTO DO MOMENTO DE FLEXÃO DO CARTÃO (ÁREA NÃO VINCADA) COMPARATIVAMENTE AO MOMENTO DE FLEXÃO DO VINCO.
 FONTE: O AUTOR (2013)

Na FIGURA 5.10 pode-se verificar que o *RCS CD* é inversamente proporcional à diferença entre o momento de flexão do papel e do vinco.

Analogamente para o *RCS MD* conforme FIGURA 5.11, pode-se observar que o *RCS MD* é inversamente proporcional à diferença entre o momento de flexão do papel e do vinco.

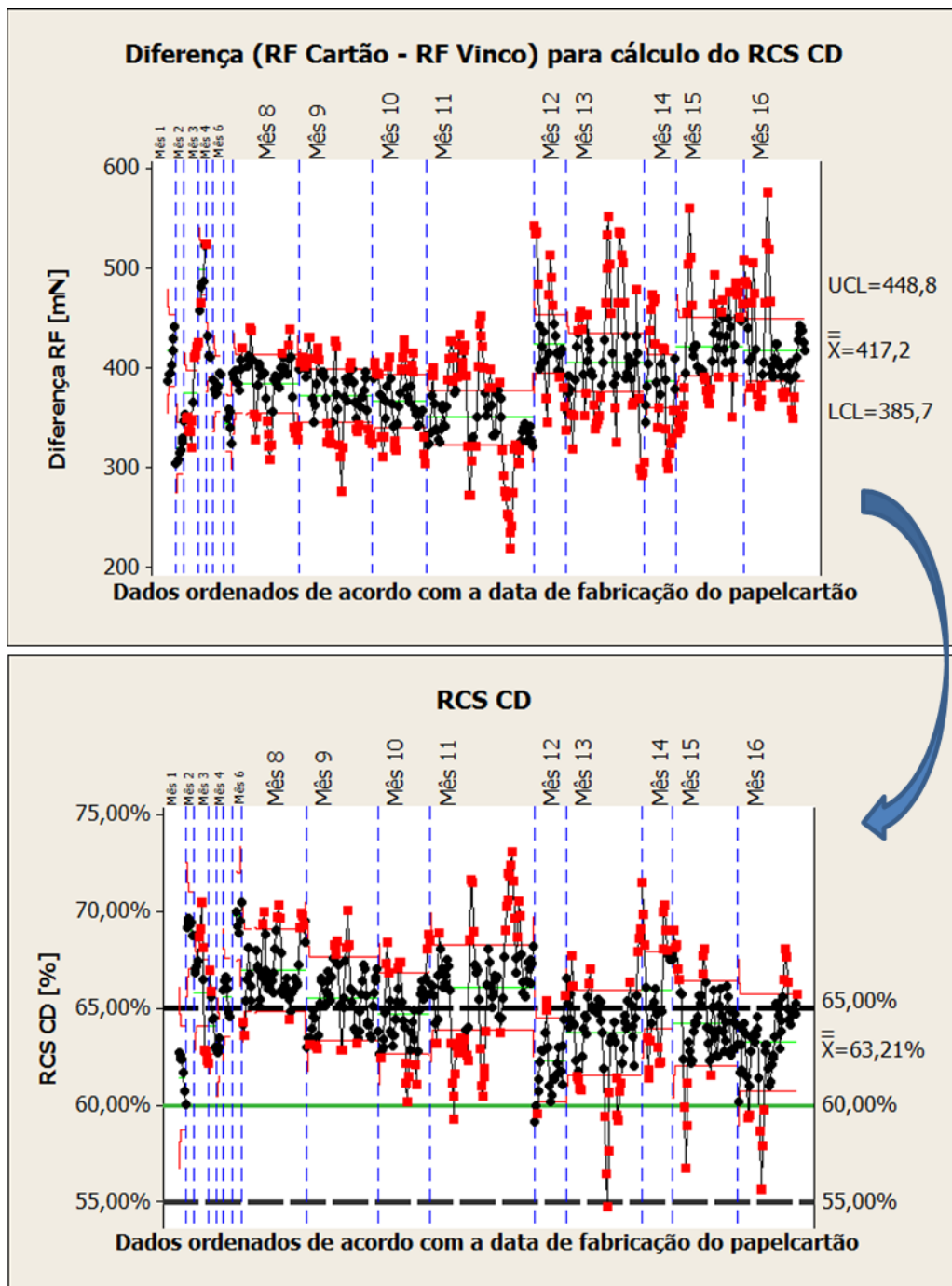


FIGURA 5.10 - RCS CD É INVERSAMENTE PROPORCIONAL À DIFERENÇA ENTRE O MOMENTO DE FLEXÃO DO CARTÃO E A DO VINCO (MF CARTÃO – MF VINCO).

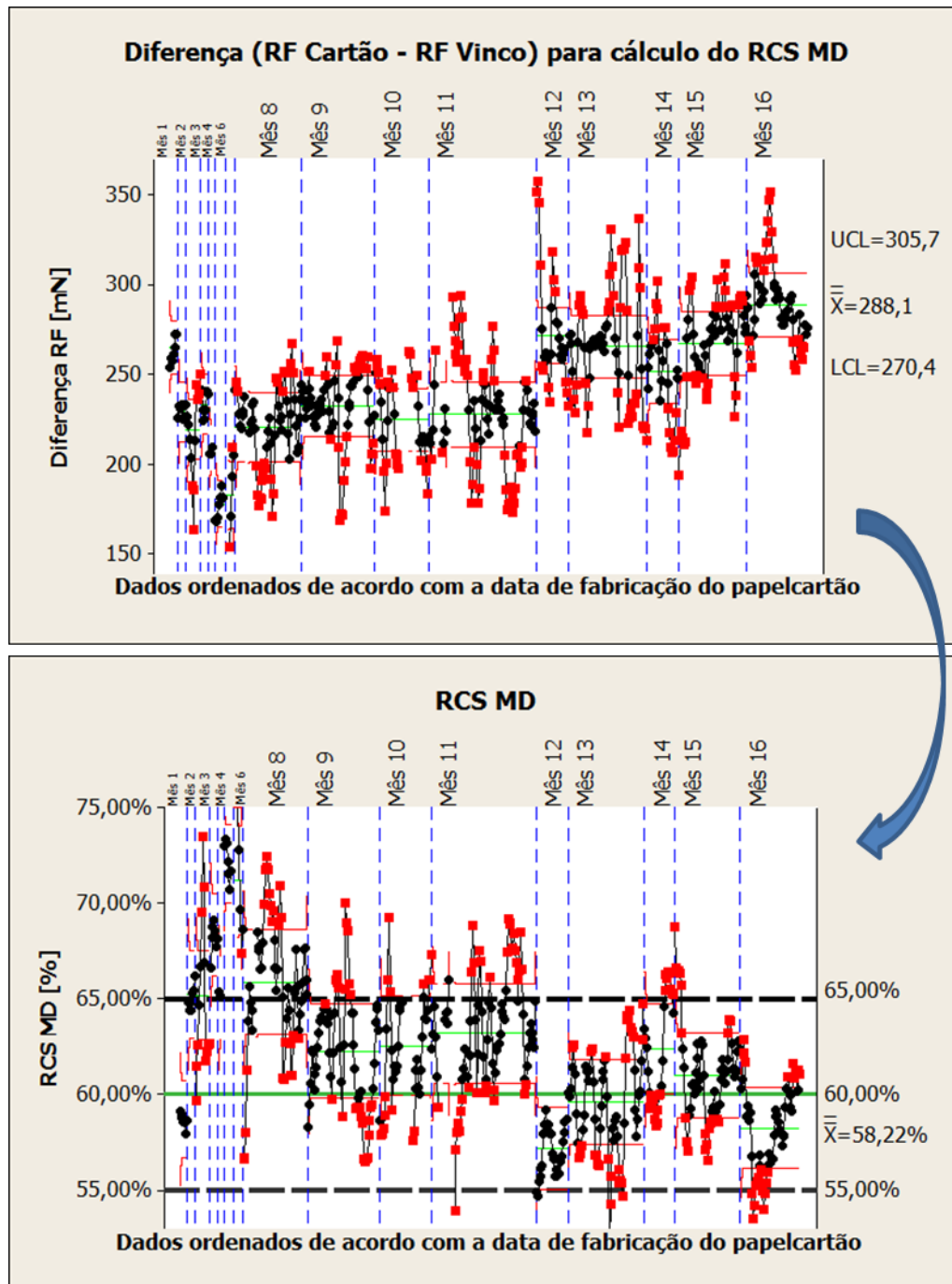


FIGURA 5.11 - RCS MD É INVERSAMENTE PROPORCIONAL À DIFERENÇA ENTRE O MOMENTO DE FLEXÃO DO CARTÃO E A DO VINCO (MF CARTÃO – MF VINCO).

A análise de regressão linear demonstrou que a relação entre o *RCS* e a diferença entre MF Cartão – MF Vinco é significativa tanto para *CD* como para *MD*.

Na FIGURA 5.12 a regressão linear de *RCS CD* versus MF Cartão – MF Vinco apresentou R^2 de 0,7567, com p-valor < 0,05, estatisticamente significativa.

Na FIGURA 5.13 a regressão linear de *RCS MD* versus MF Cartão – MF Vinco apresentou R^2 de 0,7464, com p-valor < 0,05, estatisticamente significativa.

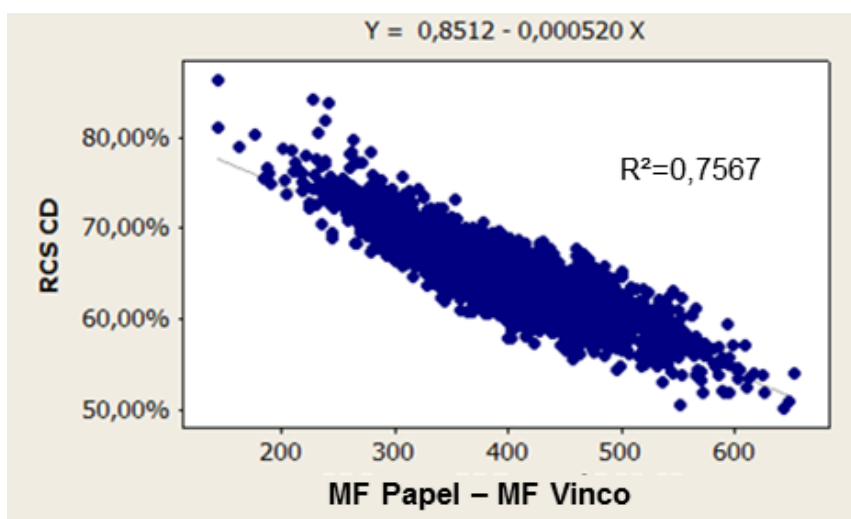


FIGURA 5.12 - REGRESSÃO LINEAR DE RCS CD E MF CARTÃO – MF VINCO.

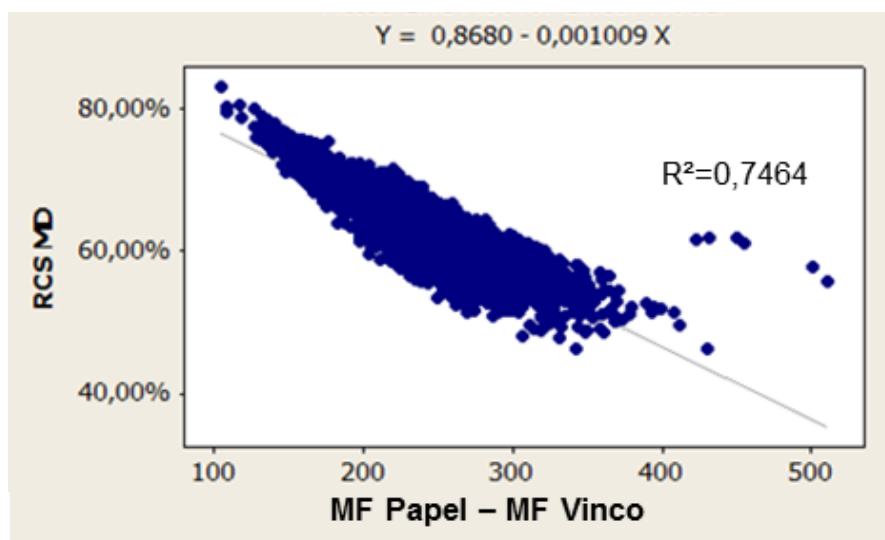


FIGURA 5.13 - REGRESSÃO LINEAR DE RCS MD E MF CARTÃO – MF VINCO

O comportamento esperado:

$$\uparrow RCS_{CD} = \left(\frac{\text{Resistência à Flexão Vinco}}{\text{Resistência à Flexão Cartão}} \right) \uparrow =$$

(5.1)

Esperava-se que os maiores valores de RCS fossem obtidos devido ao maior momento de flexão do vinco (Equação 5.1), porém o comportamento observado foi o contrário.

O comportamento observado:

$$\uparrow RCS_{CD} = \left(\frac{\text{Resistência à Flexão Vinco}}{\text{Resistência à Flexão Cartão}} \right) \downarrow = \quad (5.2)$$

O aumento de RCS ocorreu devido à redução do momento de flexão do cartão. O momento de flexão do vinco permaneceu quase estável (Equação 5.2).

Na FIGURA 5.14 o menor valor de momento de flexão nos pontos 2 e 5 levaram a maior RCS .

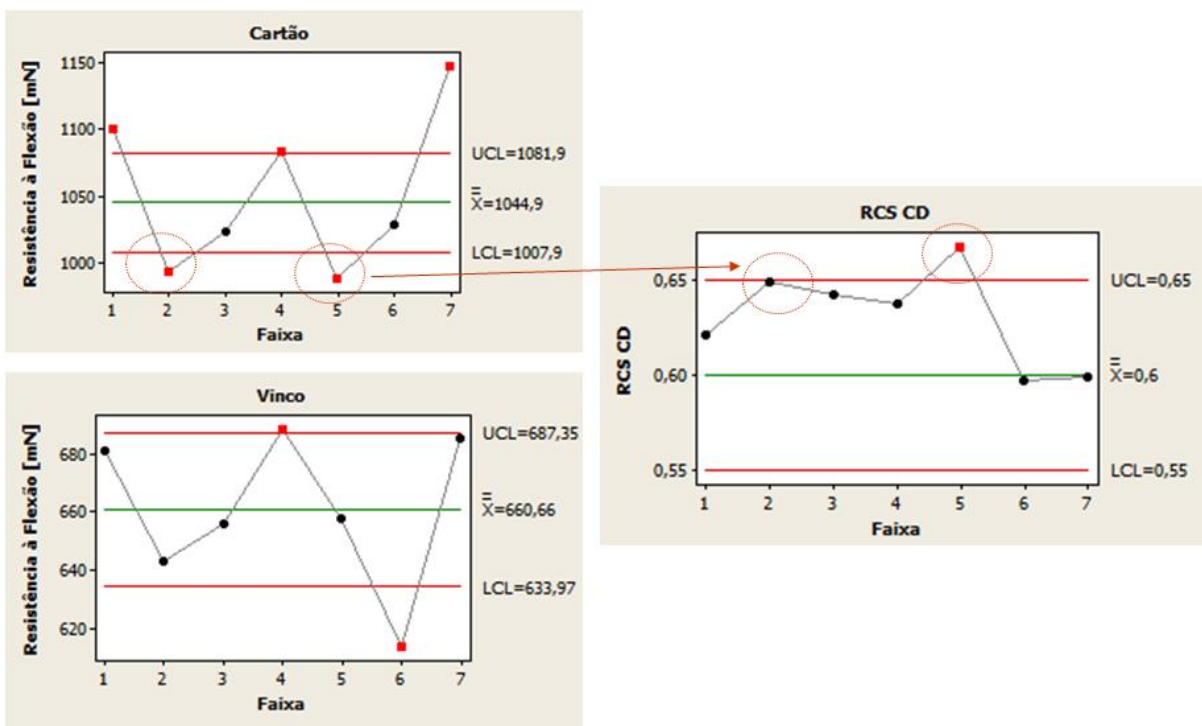


FIGURA 5.14 - PERFIL DE MOMENTO DE FLEXÃO DO PAPEL, DO VINCO E RCS DAS SETE FAIXAS DE UMA BOBINA COM VALOR PONTUAL DE RCS ALTO.

Na FIGURA 5.15 o menor RCS foi obtido na faixa 6, onde o momento de flexão do papel está maior. Era esperado menor RCS na faixa 4, que apresenta a menor resistência à flexão do vinco, que não ocorreu.

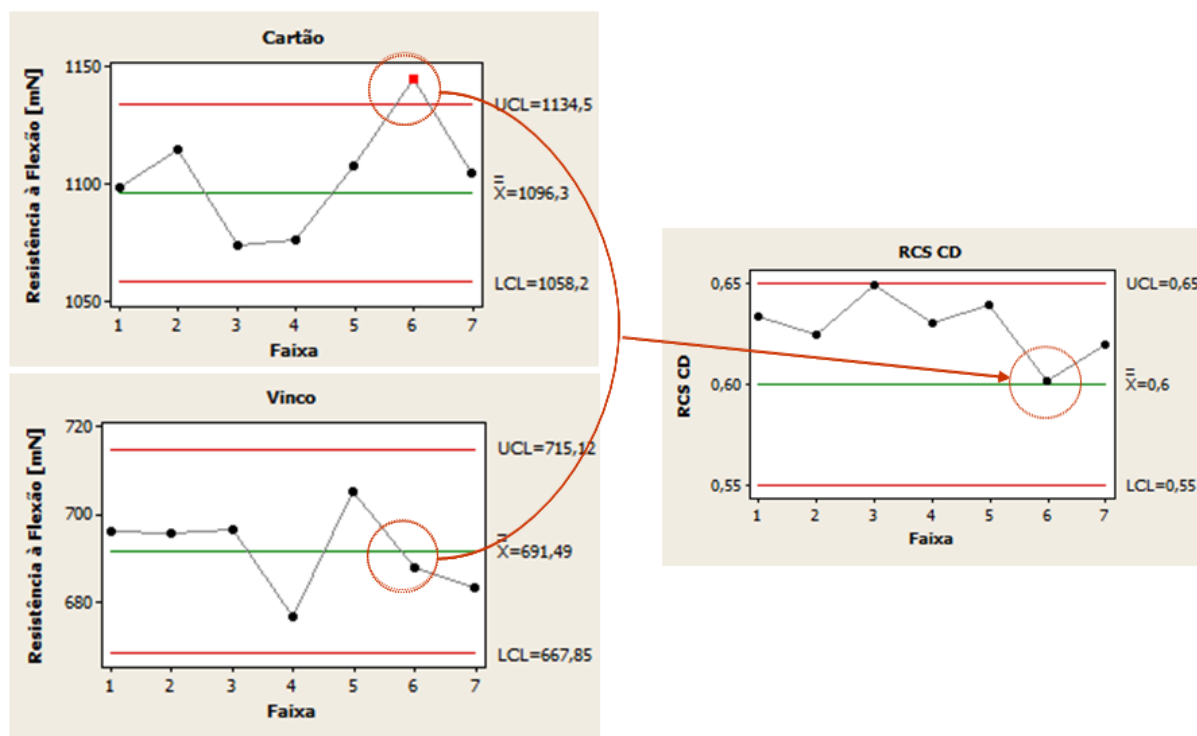


FIGURA 5.15 - PERFIL DE MOMENTO DE FLEXÃO DO PAPEL, DO VINCO E RCS DAS SETE FAIXAS DE UMA A BOBINA COM VALOR PONTUAL DE RCS BAIXO.

Observa-se nas FIGURAS 5.10 a 5.15 que o RCS apresenta maior correlação com a variação do momento de flexão do papel do que com as variações do momento de flexão do vinco.

Em suma, os piores valores de RCS, acima da especificação, estão relacionados a valores mais baixos do momento de flexão do cartão. O momento de flexão do vinco permaneceu estável.

5.2 COMPARATIVO DE MEDIÇÃO DE MOMENTO DE FLEXÃO: TAPPI T 556 E MÉTODO PARA DETERMINAÇÃO DE RCS

A FIGURA 5.16 apresenta os resultados do comparativo da análise de momento de flexão a 15° e 50 mm de acordo com o método TAPPI T 556 e a 30° e 10 mm de acordo com o método para medição de RCS, realizado em um perfil transversal de um rolo jumbo com 24 setores.

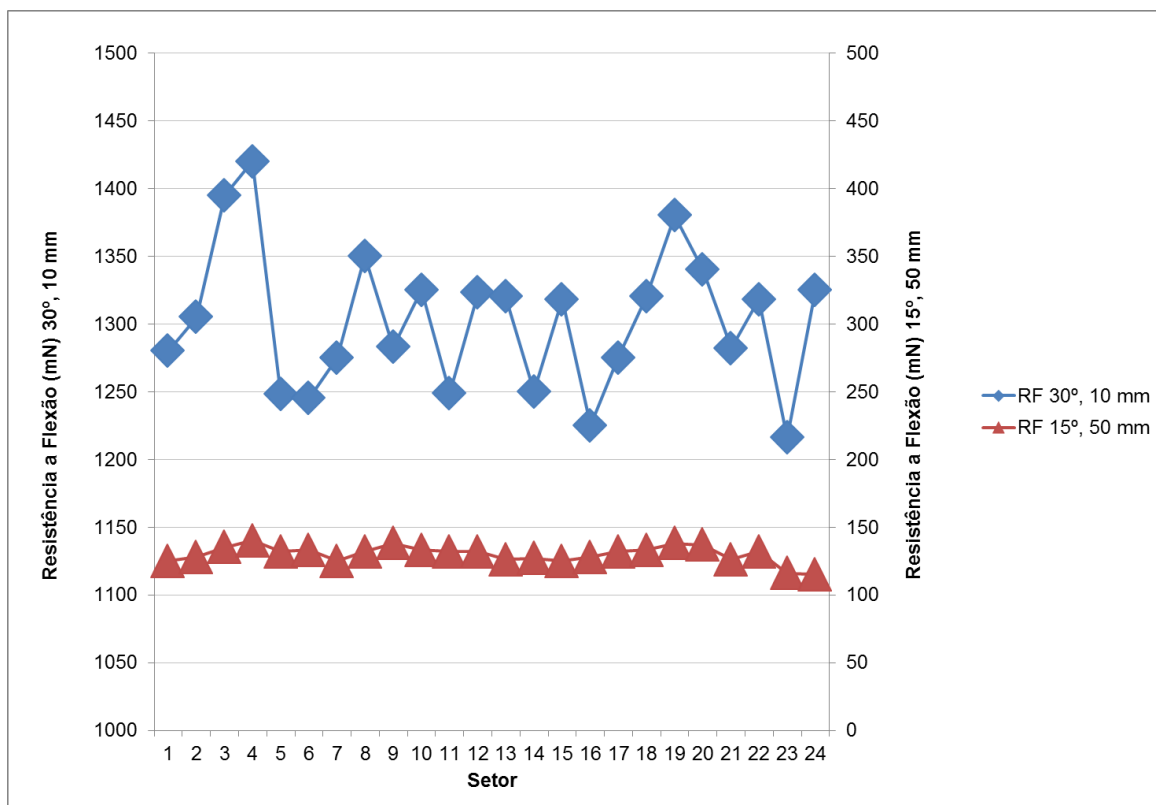


FIGURA 5.16 - RESISTÊNCIA À FLEXÃO DO PAPELCARTÃO A 30°, 10 MM E A 15°, 50 MM.

A amplitude da medição a 30° e 10 mm atingiu 204 mN enquanto a amplitude da medição a 15° e 50 mm atingiu 25 mN.

A resistência à flexão do papelcartão a 15° e 50 mm de acordo com o método TAPPI T 556 apresentou uma variabilidade conhecida, observada comumente durante a produção, porém a amplitude da medição a 30° e 10 mm foi quase dez vezes maior. Esta diferença significativa afeta diretamente a determinação de RCS.

5.3 AVALIAÇÃO DO ÂNGULO DE MÁXIMO MOMENTO

Amostras do cartão em estudo CLC/C Duplex 80 mN produzidos nas máquinas de papel 7 e 9 foram coletadas e analisadas.

Na FIGURA 5.17 (a) verifica-se que o máximo momento de dobra na direção MD ocorreu a $23,5^\circ$, ou seja, antes de 30° e desta forma o momento máximo obtido até 90° é o mesmo obtido até 30° .

Porém demonstra-se na FIGURA 5.17 (b) que o máximo momento de flexão na direção CD ocorreu em 45° . Desta forma o momento máximo obtido até 90° é maior que o obtido até 30° .

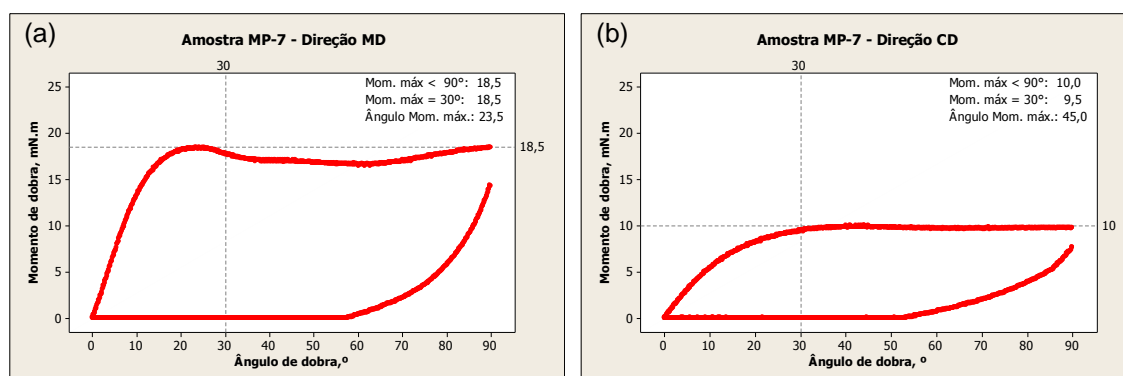


FIGURA 5.17 - MOMENTO DE DOBRA DE PAPELCARTÃO NÃO VINCADO DA MP-7. (A) DIREÇÃO MD. (B) DIREÇÃO CD.

Este comportamento também foi verificado nas medições realizadas por Sebes (2010) conforme FIGURA 5.18 na linha hachurada, identificada como 'Não vincado L=10 mm'. O momento máximo não foi atingido até 30° .

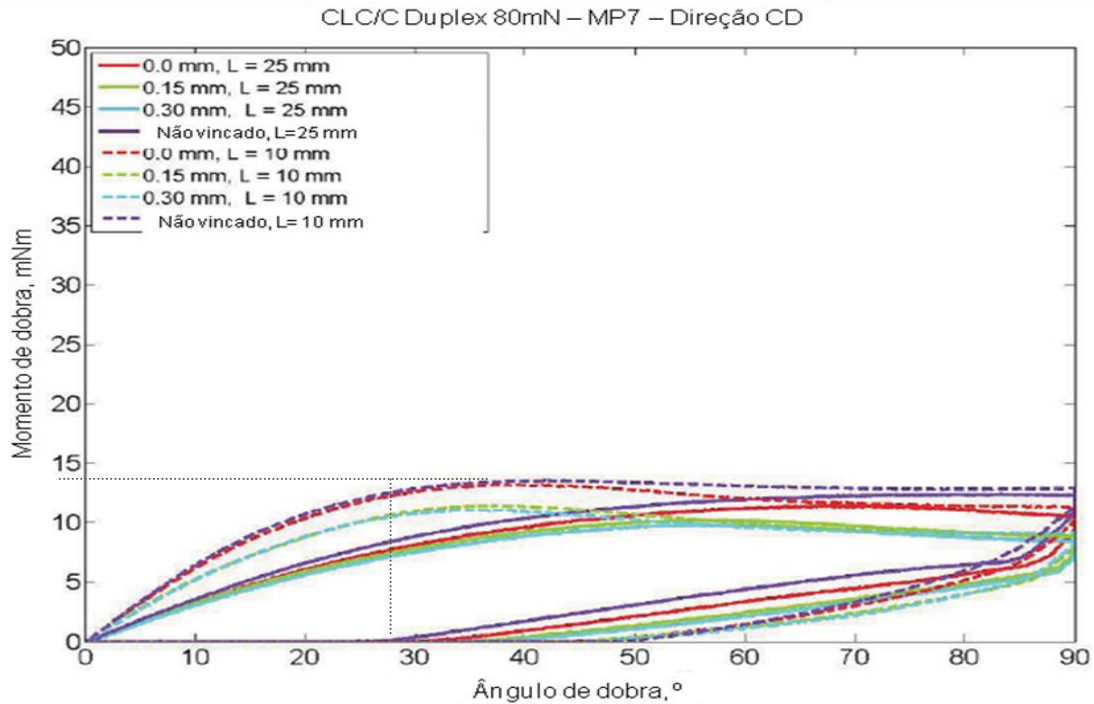


FIGURA 5.18 - MOMENTO DE DOBRA DE PAPELCARTÃO NÃO VINCADO DA MP-7 NA DIREÇÃO CD. FONTE: SEBES (2010)

Não atingir o momento de flexão máximo até 30° implica em impacto no RCS, pois um menor denominador levará a maiores valores no cálculo de RCS.

Este comportamento pode explicar o motivo pelo qual as ocorrências de RCS acima da especificação apresentam momento de flexão do papelcartão mais baixas, pois o valor de momento máximo não foi atingido.

Sebes (2010) também realizou medições em papelcartão de outro fabricante. Estas amostras apresentaram momento de flexão máximo inferior a 30° tanto na direção MD como na direção CD. FIGURA 5.19.

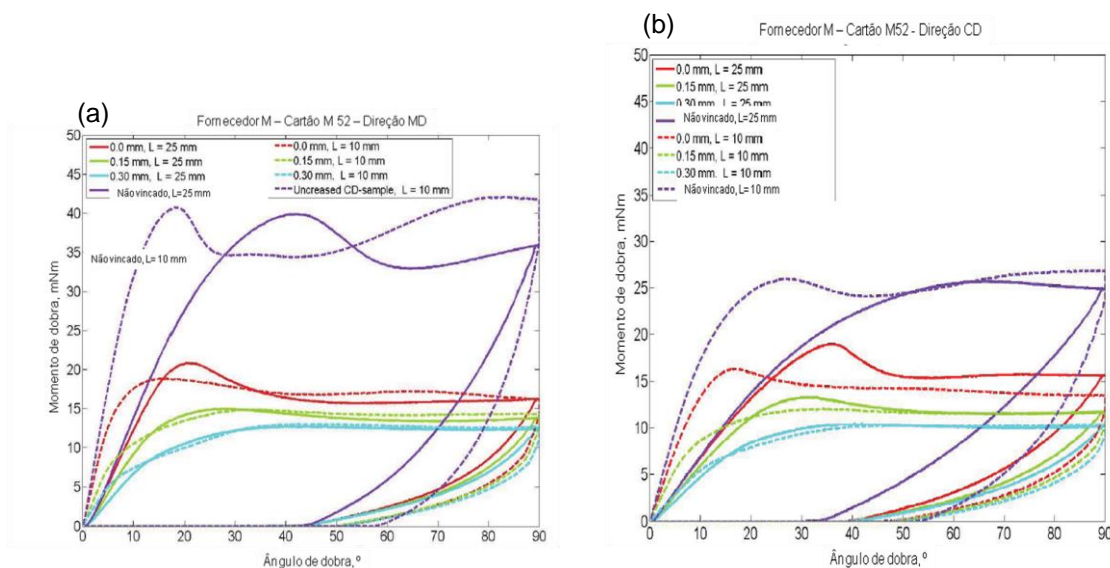


FIGURA 5.19 - MOMENTO DE DOBRA DE PAPELCARTÃO DE OUTRO FABRICANTE.
(A) DIREÇÃO MD. (B) DIREÇÃO CD.
FONTE: SEBES (2010)

Uma possível explicação para a diferença do papelcartão da MP-7 é a caixa de entrada com conceito 'StrataFlow'. As camadas base e meio são formadas na mesma caixa de entrada, que atribui características únicas ao papelcartão produzido, como a impossibilidade de delaminar estas camadas devido ao entrelaçamento das fibras destas camadas durante a formação.

5.4 AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO RCS E PROFUNDIDADE DE VINCO AO LONGO DO PERFIL TRANSVERSAL DA BOBINA

Os dados de RCS foram organizados em faixas para permitir possíveis variações ao longo do perfil, conforme FIGURAS 5.20 e 5.21.

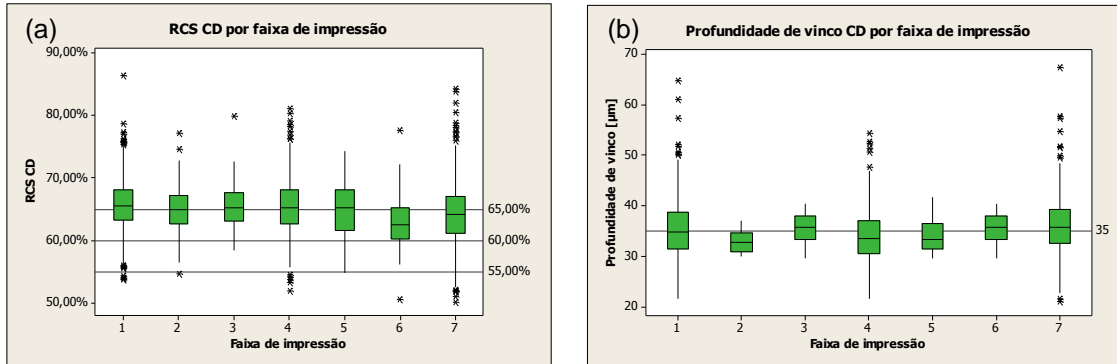


FIGURA 5.20 - (A) PERFIL DE RCS CD NAS FAIXAS 1 A 7. (B) PERFIL DE PROFUNDIDADE DE VINCO NAS FAIXAS 1 A 7.

As faixas 1, 4 e 7 apresentam maior variação devido ao maior número de medições realizadas nestas faixas para controle de qualidade.

Variação similar é observada na profundidade de vinco, cujo método de medição está descrito no Apêndice.

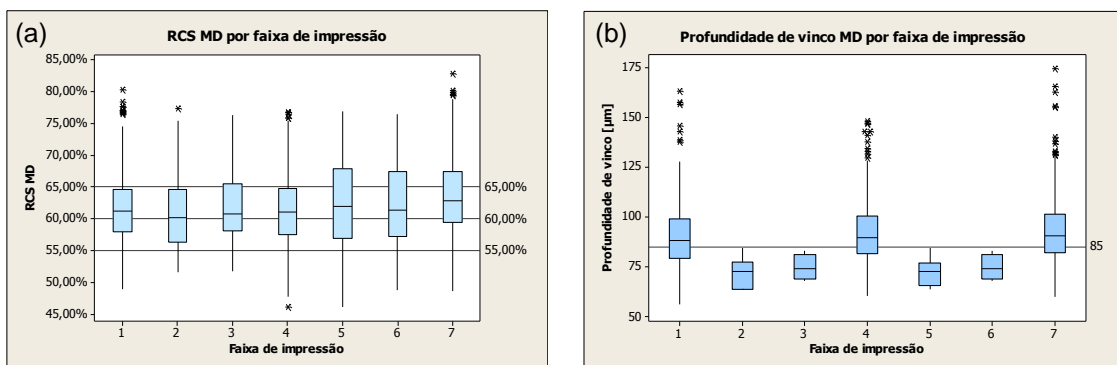


FIGURA 5.21 - (A) PERFIL DE RCS MD NAS FAIXAS 1 A 7. (B) PERFIL DE PROFUNDIDADE DE VINCO NAS FAIXAS 1 A 7.

As faixas 5, 6 e 7 apresentaram *RCS MD* ligeiramente maiores e com maior variabilidade. Este comportamento pode estar relacionado ao alinhamento e controle de distância entre os cilindros.

5.5 AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO RCS E PROFUNDIDADE DE VINCO AO LONGO DO PERFIL LONGITUDINAL DA BOBINA

Os dados de *RCS* foram organizados por placa vencedora, conforme FIGURAS 5.22 e 5.23.

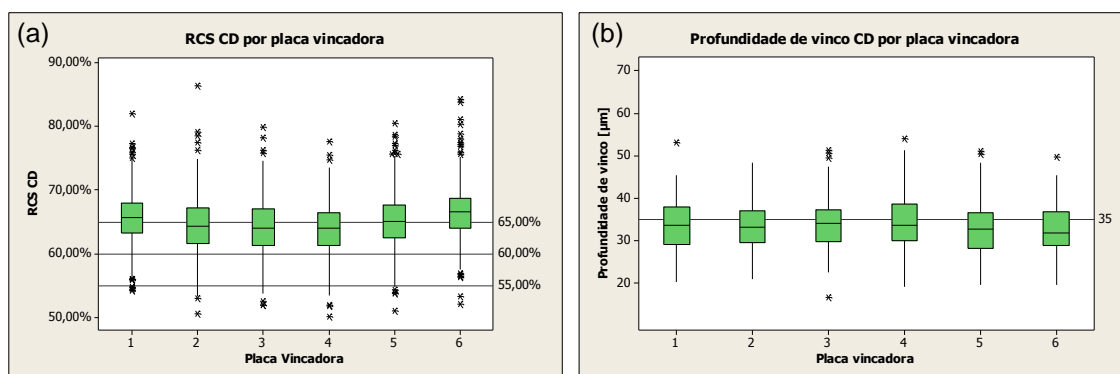


FIGURA 5.22 - (A) PERFIL DE RCS CD NAS PLACAS 1 A 6. (B) PERFIL DE PROFUNDIDADE DE VINCO NAS PLACAS 1 A 6.

Pode-se dizer que as placas vencedoras 1 e 6 apresentaram *RCS CD* ligeiramente maiores que as demais, que pode ser justificado, entre outros fatores, pela menor profundidade de vinco nestas placas.

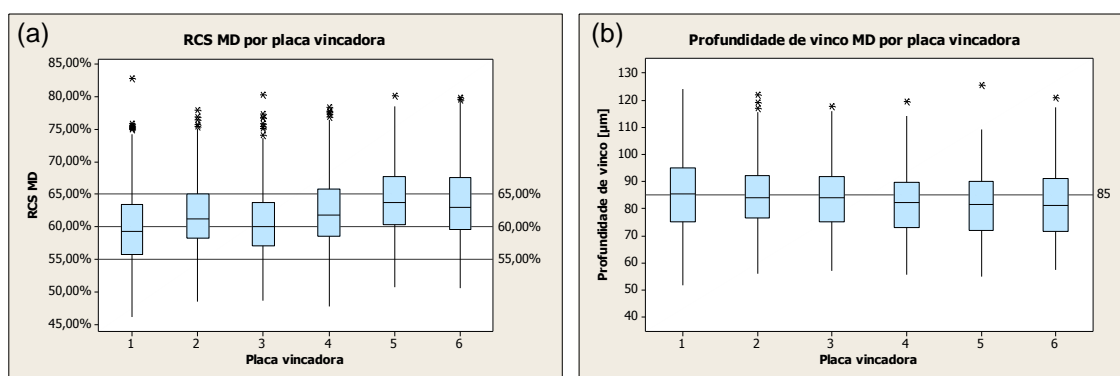


FIGURA 5.23 - (A) PERFIL DE RCS MD NAS PLACAS 1 A 6. (B) PERFIL DE PROFUNDIDADE DE VINCO NAS PLACAS 1 A 6.

Na FIGURA 5.23 é possível observar menores valores de RCS nas placas 1 a 3, onde estão as maiores profundidades de vinco (b). Pode ser indicação de desgaste desigual devido a desalinhamento ou necessidade de troca das placas.

5.6 AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO RCS VERSUS PROFUNDIDADE DE VINCO

A profundidade de vinco foi medida com aparelho analisador de superfície por contato Talysurf da Taylor Hobson (Apêndice). Na FIGURA 5.24 as linhas representam a profundidade de vinco e os pontos o RCS medido. Pode-se observar que maior profundidade de vinco leva a valores menores de RCS. A profundidade de vinco, entretanto é limitada a ocorrência de trincas superficiais no cartão.

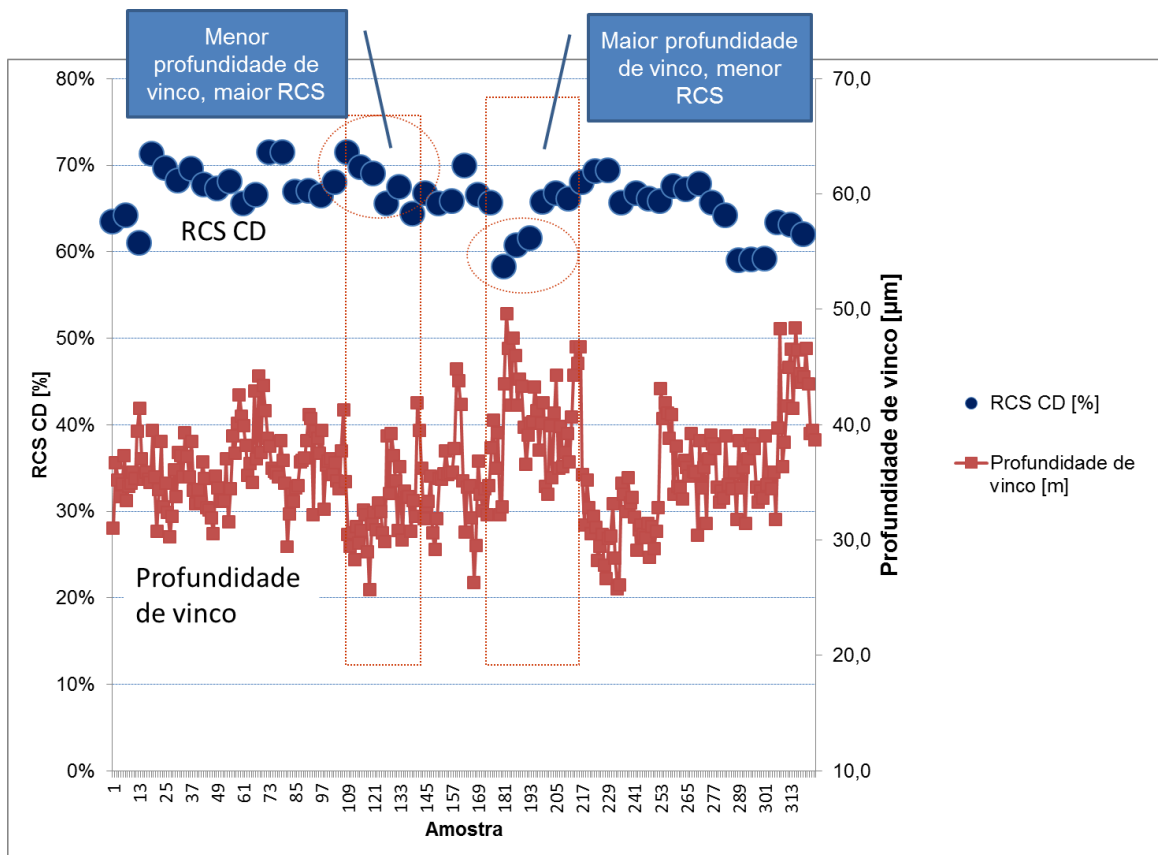


FIGURA 5.24 - COMPORTAMENTO DO RCS VARIA COM A PROFUNDIDADE DE VINCO

De acordo com Nagasawa *et al.* (2001) o momento de flexão do vinco apresenta correlação com a altura inicial do vinco.

A regressão linear apontou $R^2=0,1980$, com p -valor $< 0,05$, significativa (FIGURA 5.25).

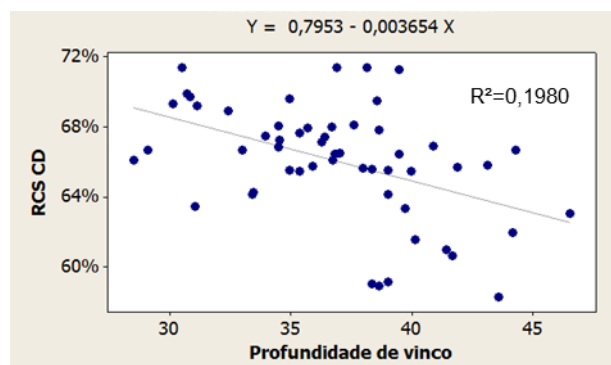


FIGURA 5.25 - REGRESSÃO LINEAR DE RCS CD E PROFUNDIDADE DO VINCO

Para Mentrasti *et al.* (2013) o papelcartão apresenta um comportamento mecânico de grande variabilidade, evidenciado durante os testes de resistência, o qual apresenta significativa dependência da profundidade do vinco.

5.7 INVESTIGAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO PAPELCARTÃO E SUA INFLUÊNCIA NO COMPORTAMENTO DO RCS

Na FIGURA 5.26 observa-se que há um indicativo de que quanto menor a mediana de *Ply Bond* melhor o valor de *RCS*. A faixa de *RCS* abaixo de 0,60 apresentou mediana de *Ply Bond* de 202 J/m² e a faixa com os maiores valores de *RCS*, acima de 0,70, apresentou mediana de *Ply Bond* de 217 J/m².

Na FIGURA 5.27 o *RCS MD* apresentou redução mais acentuada que o *RCS CD*, para valores mais baixos de *Ply Bond*, observados ao longo dos meses.

Os asteriscos acima e abaixo do diagrama de caixas representam *outliers*, valores atípicos que apresentam um grande afastamento dos demais da série.

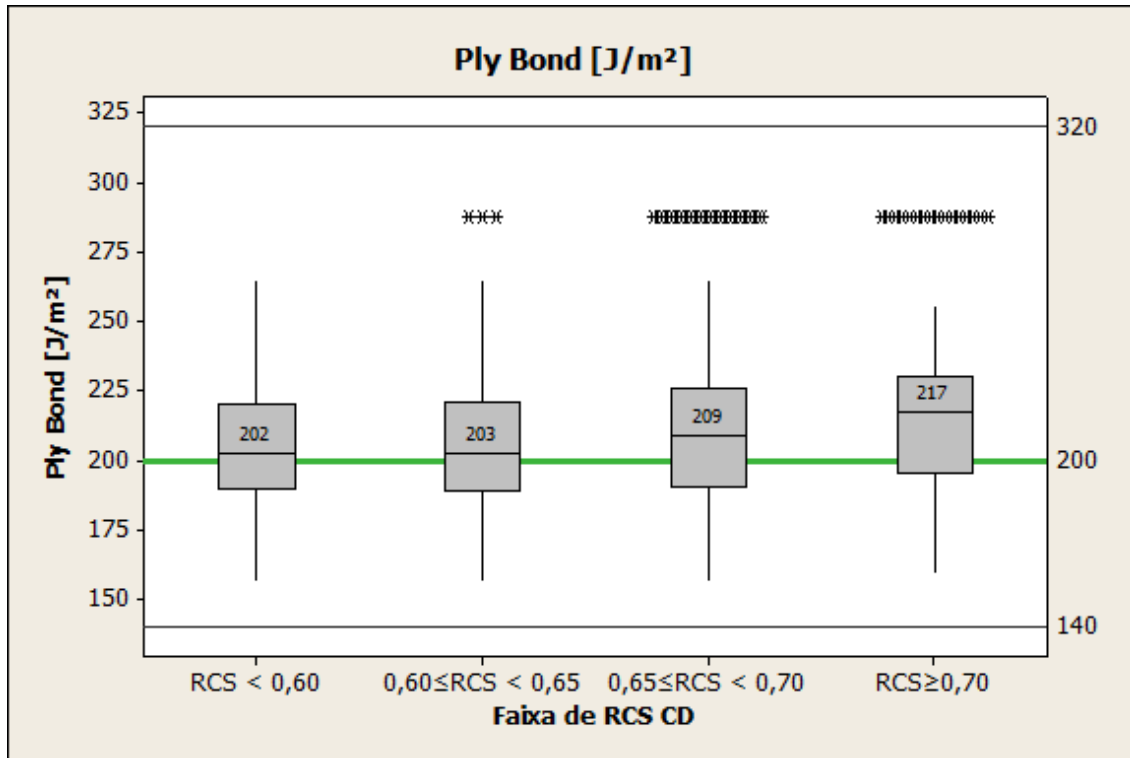


FIGURA 5.26 - MENORES VALORES DE PLY BOND: MELHORES VALORES DE RCS.

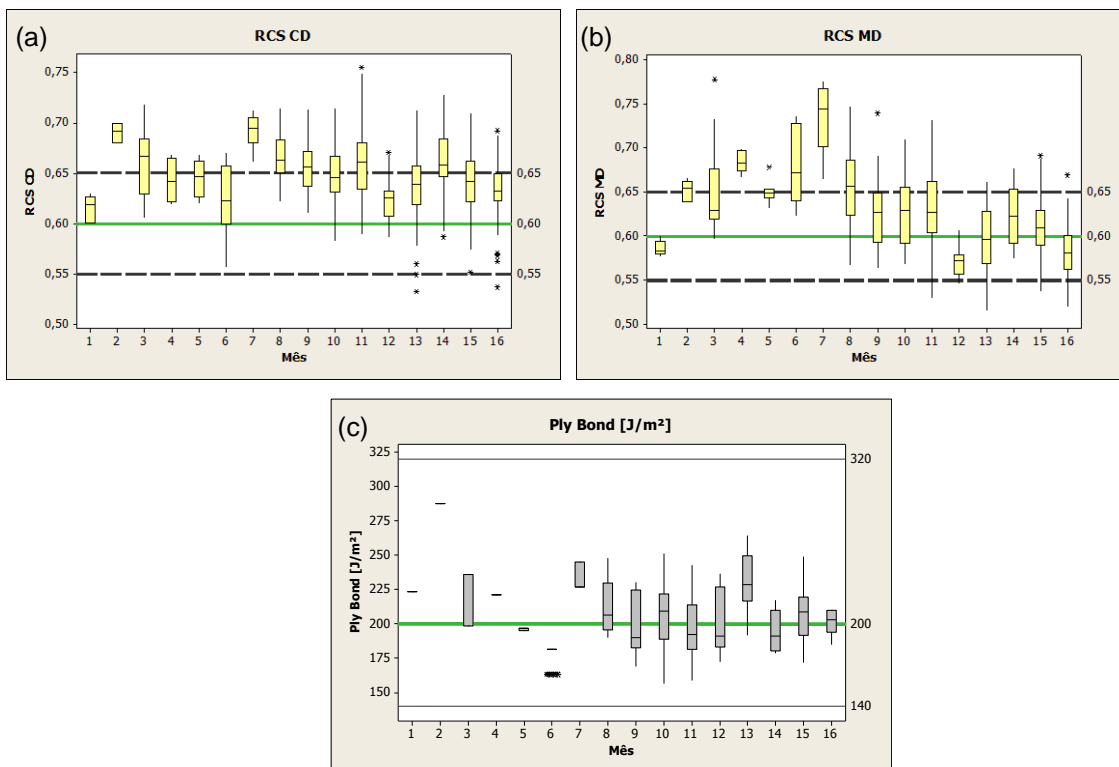


FIGURA 5.27 - PLY BOND APRESENTA MAIOR IMPACTO SOBRE RCS MD.

O ZDT apresentou comportamento semelhante ao *Ply Bond* conforme FIGURAS 5.28 e 5.29. Há um indicativo de que quanto menor a mediana de ZDT

melhor o valor de *RCS*. A faixa de *RCS* abaixo de 0,60 apresentou mediana de ZDT de 394 kPa e a faixa com os maiores valores de *RCS*, acima de 0,70, apresentou mediana de ZDT de 412 J/m².

Na FIGURA 5.29 o *RCS MD* apresentou redução mais acentuada que o *RCS CD*, para valores mais baixos de ZDT, mesmo comportamento observado para *Ply Bond*.

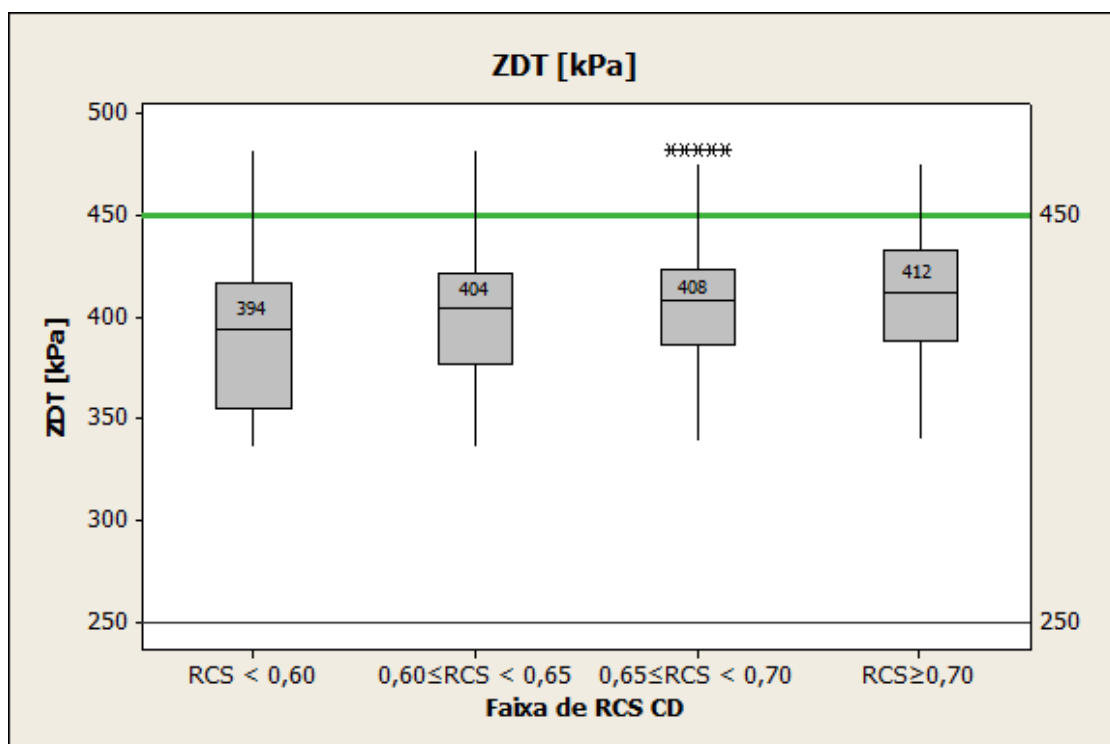


FIGURA 5.28 - MENORES VALORES DE ZDT: MELHOR FAIXA DE VALORES DE RCS

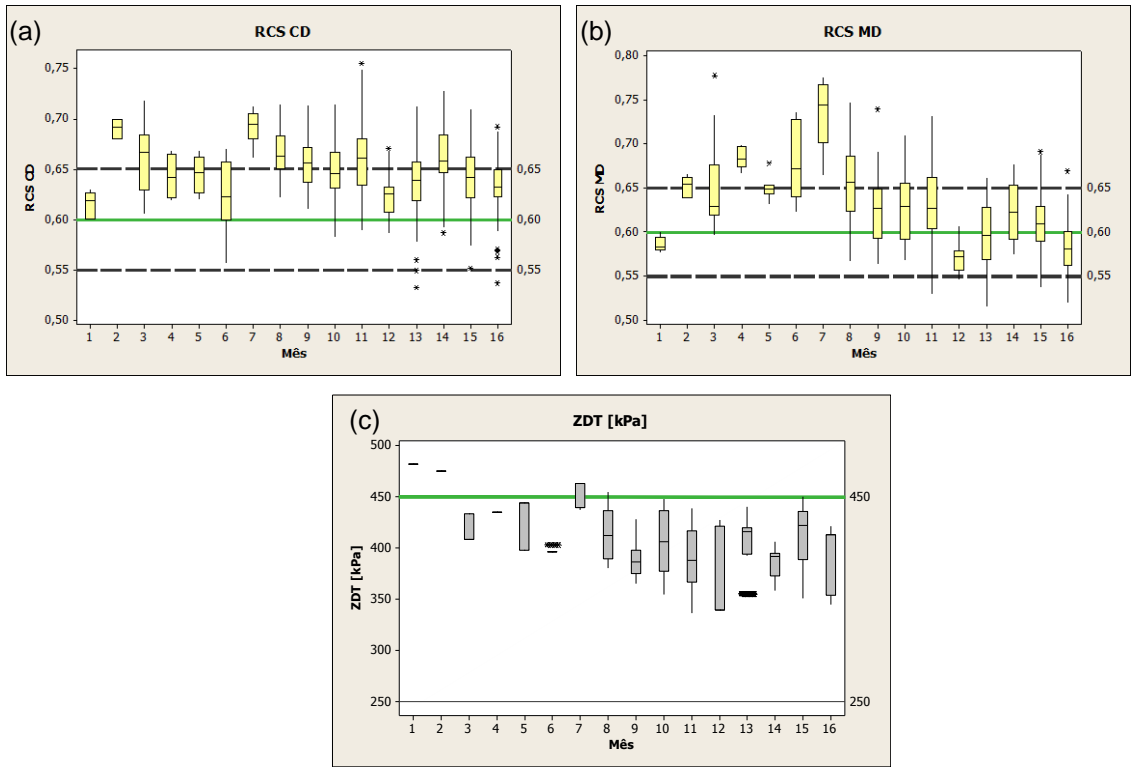


FIGURA 5.29 - MENORES VALORES DE ZDT: MELHORES VALORES DE RCS

Sebes (2010) observou que o papelcartão com maior espessura apresenta geralmente menor RCS, porém este comportamento não foi constatado nas medições deste estudo, por se tratar de pequenas variações de apenas um produto (CLC/C Duplex 80 mN). FIGURAS 5.30 e 5.31.

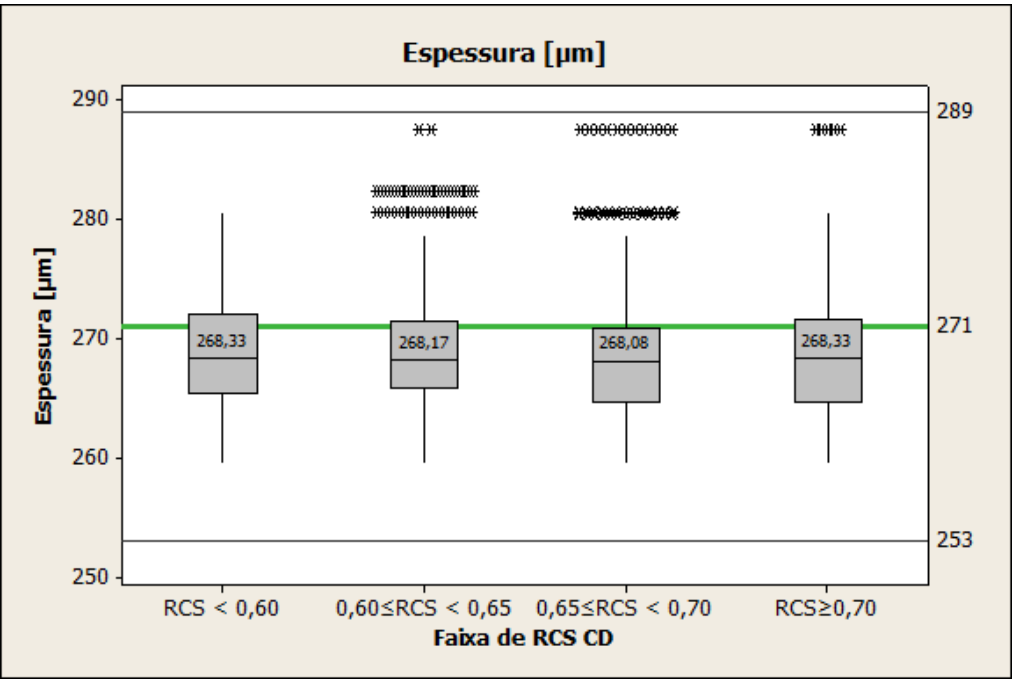


FIGURA 5.30 - ESPESSURA NÃO DEMONSTROU CORRELAÇÃO COM RCS

O impacto é evidente ao comparar produtos de espessuras diferentes. Papelcartão de maior espessura, que apresente a mesma estrutura e composição, apresenta maior facilidade de vincagem.

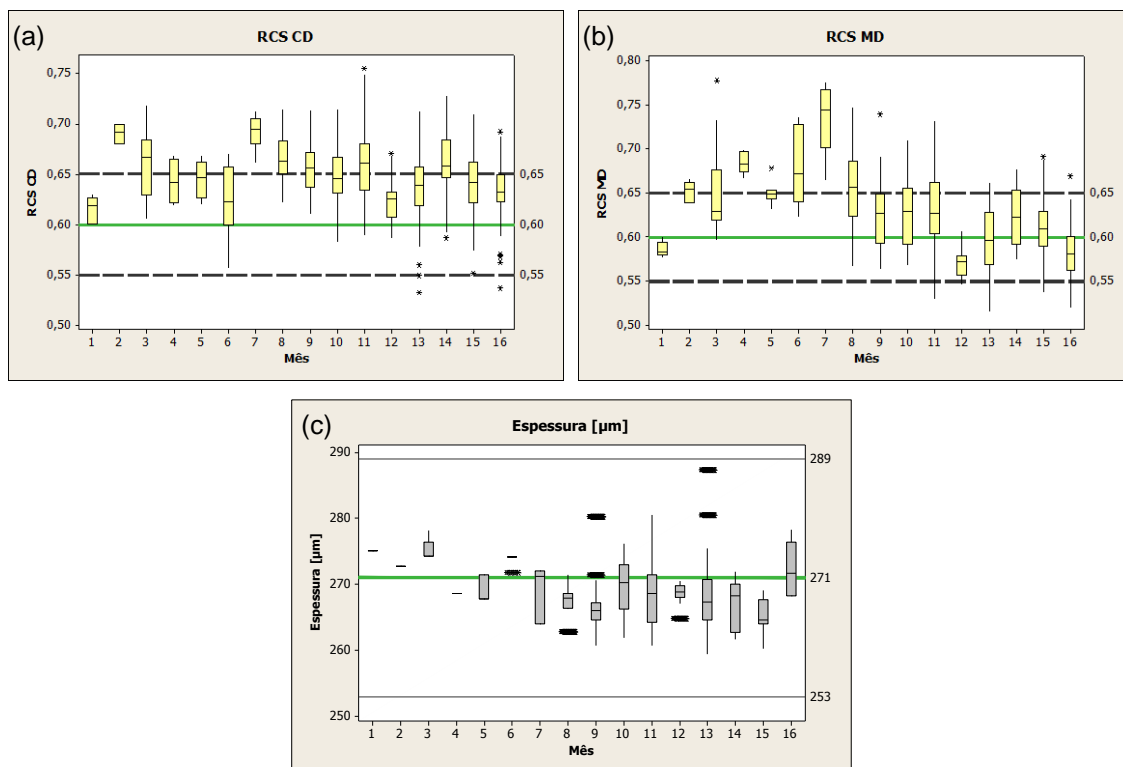


FIGURA 5.31 - ESPESSURA POR FAIXA DE RCS

O SCT – *Short Compression Test*, também não apresentou correlação com RCS. Para as quatro faixas de RCS os valores de SCT são semelhantes, demonstrando não haver correlação. FIGURA 5.32.

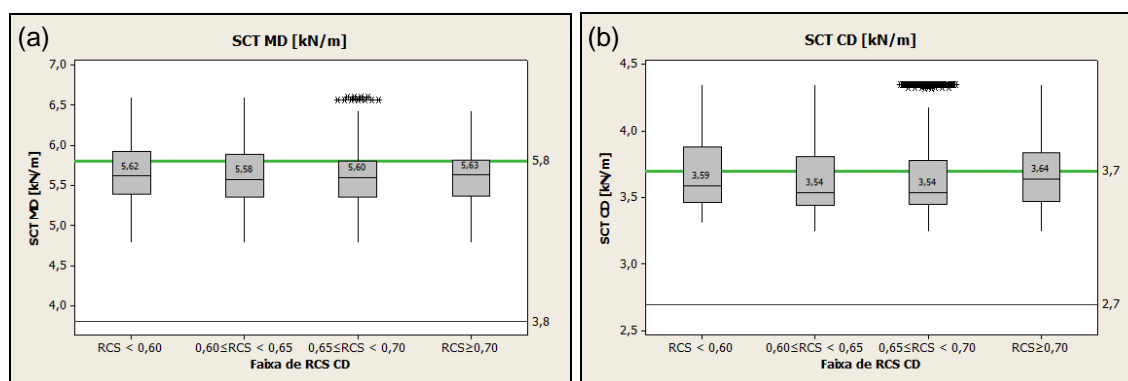


FIGURA 5.32 - SCT MD E CD POR FAIXA DE RCS

Papelcartão com maior resistência à flexão GM e maior índice de resistência à flexão foi observado na faixa de melhor RCS.

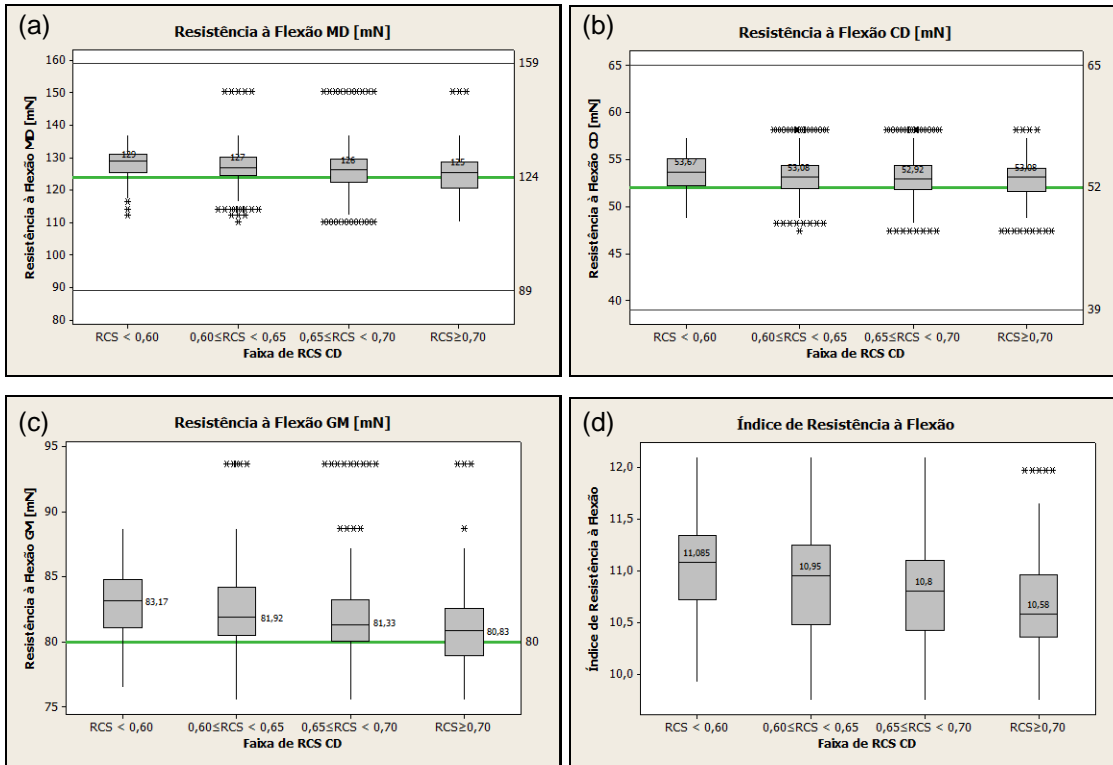


FIGURA 5.33 - RESISTÊNCIA À FLEXÃO GM E ÍNDICE POR FAIXA DE RCS

Sebes (2010) relatou que as amostras MD (vinco CD) são influenciadas pela tração MD e vice versa para amostras CD (vinco MD). Pode-se observar o mesmo comportamento na FIGURA 5.34 (b), onde os menores valores de RCS CD foram obtidos nas bobinas com menor tração CD.

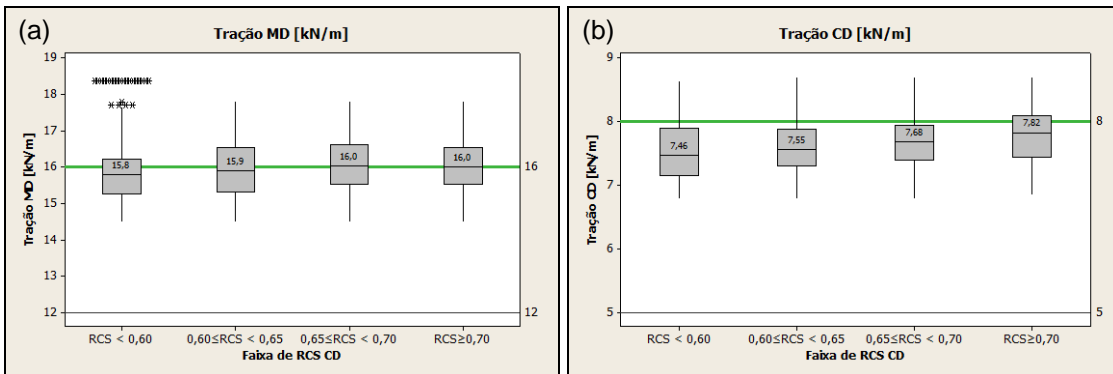


FIGURA 5.34 - TRAÇÃO E RCS SÃO DIRETAMENTE PROPORCIONAIS. RCS CD É INFLUENCIADO PELA TRAÇÃO CD.

6 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DAS VARIÁVEIS

Utilizando a função regressão do Minitab® 16 obteve-se a equação (6.1) a partir dos valores de RCS e propriedades do papelcartão selecionadas para o estudo:

$$\begin{aligned}
 \text{RCS CD} = & 6,67 - 0,0123 \text{ Gramatura [g/m}^2\text{]} + 0,00092 \text{ Espessura [\mu m]} \\
 & + 0,0190 \text{ Umidade [\%]} + 0,0986 \text{ Res. Flexão MD [mN]} \\
 & + 0,140 \text{ Res. Flexão CD [mN]} - 0,251 \text{ Res. Flexão GM [mN]} \\
 & - 0,0758 \text{ Índice Rigid} - 1,27 \text{ Razão Res. Flexão} \\
 & - 0,000415 \text{ Ply Bond - Setor 3} + 0,000467 \text{ Ply Bond - Setor 5} \\
 & + 0,000231 \text{ ZDT - LC} - 0,00101 \text{ ZDT - M} - 0,000055 \text{ ZDT - LA} \\
 & + 0,0236 \text{ SCT MD [kN/m]} + 0,110 \text{ SCT CD [kN/m]} + 0,00974 \text{ Tração MD [kN/m]} \\
 & + 0,0028 \text{ Tração CD [kN/m]} - 0,0506 \text{ Elongação MD [\%]} \\
 & + 0,0195 \text{ Elongação CD [\%]} + 0,00272 \text{ Delaminação Base [}^\circ\text{]} \\
 & + 0,00192 \text{ Delam. Cobertura [}^\circ\text{]}
 \end{aligned}
 \tag{6.1}$$

A tabela de variáveis (TABELA 6.1) indica a direção, tamanho e significância estatística da relação entre a variável preditora e a resposta.

- O sinal de cada coeficiente indica a direção de cada relação
- Os coeficientes representam a média de alteração da resposta para uma unidade de mudança na variável preditora mantendo as demais variáveis preditoras fixas.
- P-value de cada coeficiente testa a hipótese nula que o coeficiente é igual a zero (sem efeito). E também valores baixos de p sugerem que a variável é relevante para o modelo.

TABELA 6.1 - TABELA DE VARIÁVEIS DA REGRESSÃO

Variável	Coef	SE Coef	T	P
Constant	6,671	1,740	3,83	0,000
Gramatura [g/m ²]	-0,012313	0,003345	-3,68	0,000
Espessura [µm]	0,000921	0,001097	0,84	0,402
Umidade [%]	0,01903	0,06523	0,29	0,771
Res. Flexão MD [mN]	0,09860	0,02606	3,78	0,000
Res. Flexão CD [mN]	0,14013	0,04734	2,96	0,004
Res. Flexão GM [mN]	-0,25115	0,07053	-3,56	0,001
Índice Rigid	-0,07576	0,01933	-3,92	0,000
Razão Res. Flexão	-1,2698	0,4360	-2,91	0,004
Ply Bond - Setor 3	-0,0004151	0,0002650	-1,57	0,120
Ply Bond - Setor 5	0,0004671	0,0001694	2,76	0,007
ZDT - LC	0,0002307	0,0001969	1,17	0,243
ZDT - M	-0,0010064	0,0002650	-3,80	0,000
ZDT - LA	-0,0000552	0,0001337	-0,41	0,681
SCT MD [kN/m]	0,02361	0,02185	1,08	0,282
SCT CD [kN/m]	0,10955	0,02999	3,65	0,000
Tração MD [kN/m]	0,009738	0,007880	1,24	0,219
Tração CD [kN/m]	0,00275	0,01071	0,26	0,798
Elongação MD [%]	-0,05063	0,05365	-0,94	0,347
Elongação CD [%]	0,01954	0,01997	0,98	0,330
Delaminação Base [°]	0,002723	0,001442	1,89	0,061
Delam. Cobertura [°]	0,001922	0,001633	1,18	0,241

s = 0,0234527 R-Sq = 53,5% R-Sq(adj) = 46,2%

As variáveis que apresentaram maior relevância ($p < 0,05$) para o modelo de RCS CD de acordo com a ferramenta *Regression* do Minitab® 16 foram: resistência à flexão MD, CD e GM, razão de resistência à flexão, *Ply Bond* – setor 5, ZDT Meio e SCT CD.

O resultado da utilização da ferramenta *Best subsets regression* pode ser visto na FIGURA 6.1. Considerando todas as 19 variáveis o R^2 é de 0,417, mas com apenas 8 variáveis o R^2 pode ser 0,415%.

As oito variáveis apontadas no modelo selecionado relaciona as propriedades: umidade, resistência à flexão GM, índice de resistência à flexão, *Ply Bond*, ZDT, SCT CD, tração MD e alongação CD. Baseado neste resultado propôs-se dois testes industriais focados em avaliação de diferentes níveis de *Ply Bond*:

1. Teste industrial com papelcartão da MP-7 com *Ply Bond* entre o mínimo e o nominal da especificação.
2. Teste industrial em novo vencedor com nove faixas de impressão utilizando papelcartão da MP-7 com *Ply Bond* alto e papelcartão da MP-9, que apresenta historicamente melhores resultados de RCS que da MP-7.

6.1 TESTE DE CONVERSÃO DE BOBINAS COM VALORES MAIS BAIXOS DE PLY BOND

A fim de confirmar o impacto da propriedade *Ply Bond* sobre o RCS, 32 bobinas de dois rolos jumbo de CLC/C Duplex 80 mN foram enviadas para serem convertidas, com o objetivo de avaliar os valores de RCS em diferentes níveis de *Ply Bond*.

As bobinas enviadas apresentavam valores de *Ply Bond* entre 144 a 227 J/m². O limite mínimo especificado é 140 J/m².

A conversão do material foi realizada durante três semanas.

O RCS CD das bobinas de *Ply Bond* mais baixos apresentou melhores resultados, com valores dentro do especificado (Figura 6.2), entretanto o RCS MD apresentou redução significativa nas bobinas de *Ply Bond* mais baixos (Figura 6.3) com alguns pontos abaixo do limite inferior especificado, neste caso houve necessidade de alívio dos vincadores para que o RCS voltasse ao nominal.

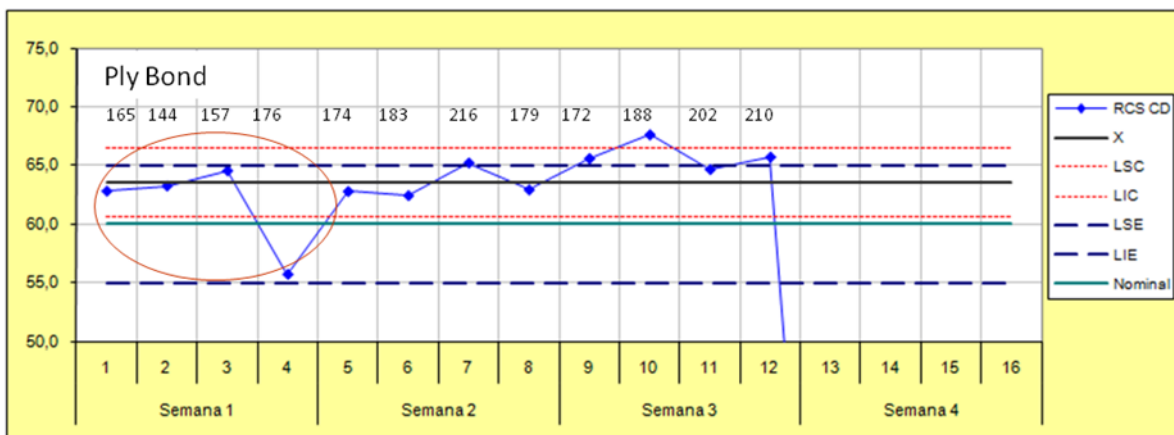


FIGURA 6.2 - RCS CD DAS BOBINAS TESTADAS

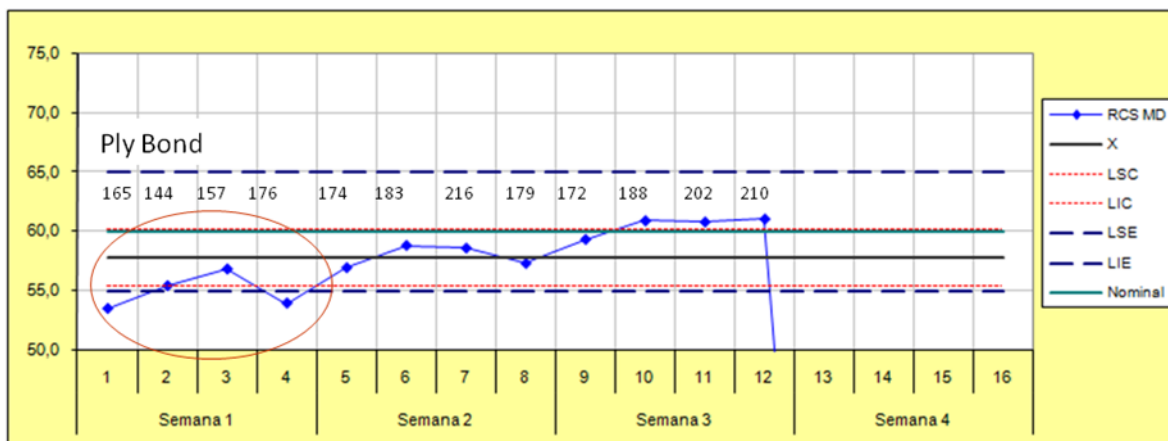


FIGURA 6.3 - RCS MD DAS BOBINAS TESTADAS

6.2 TESTE INDUSTRIAL EM NOVO VINCADOR COM NOVE FAIXAS DE IMPRESSÃO UTILIZANDO PAPELCARTÃO DA MP-7 COM *PLY BOND* ALTO E PAPELCARTÃO DA MP-9

Pode-se observar que o *RCS CD* da MP-7 é superior ao da MP9 e a maior diferença ocorre nos vincos longitudinais: *RCS MD* da MP-7 altos e *RCS MD* da MP-9 próximo ao objetivo (FIGURAS 6.4 e 6.5).

Mais uma vez comprovado maior impacto do *Ply Bond* nos vincos longitudinais e relação direta de *RCS MD* com *Ply Bond*.

O *RCS CD* da MP-7 é impactado pela quebra de vinco após 30°, que não ocorre na MP-9. Uma das hipóteses recai sobre a formação diferenciada em três caixas de entrada separadas da MP-9.

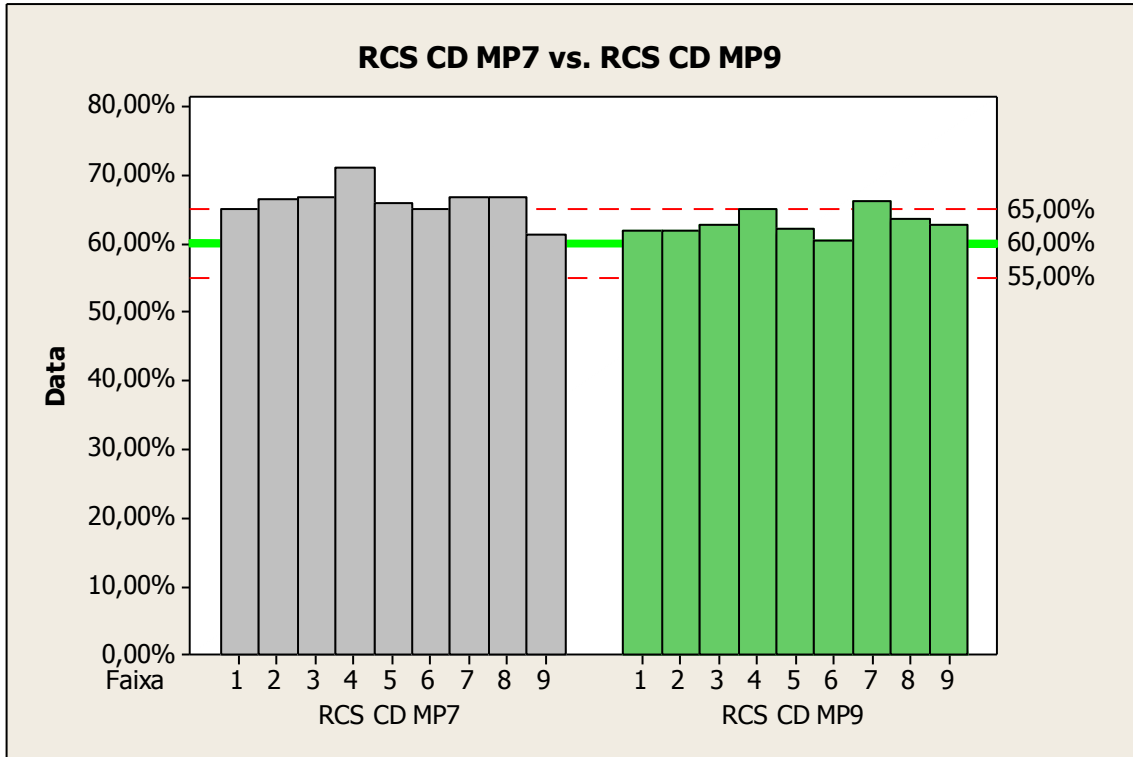


FIGURA 6.4 - RCS CD DA MP-7 E DA MP-9

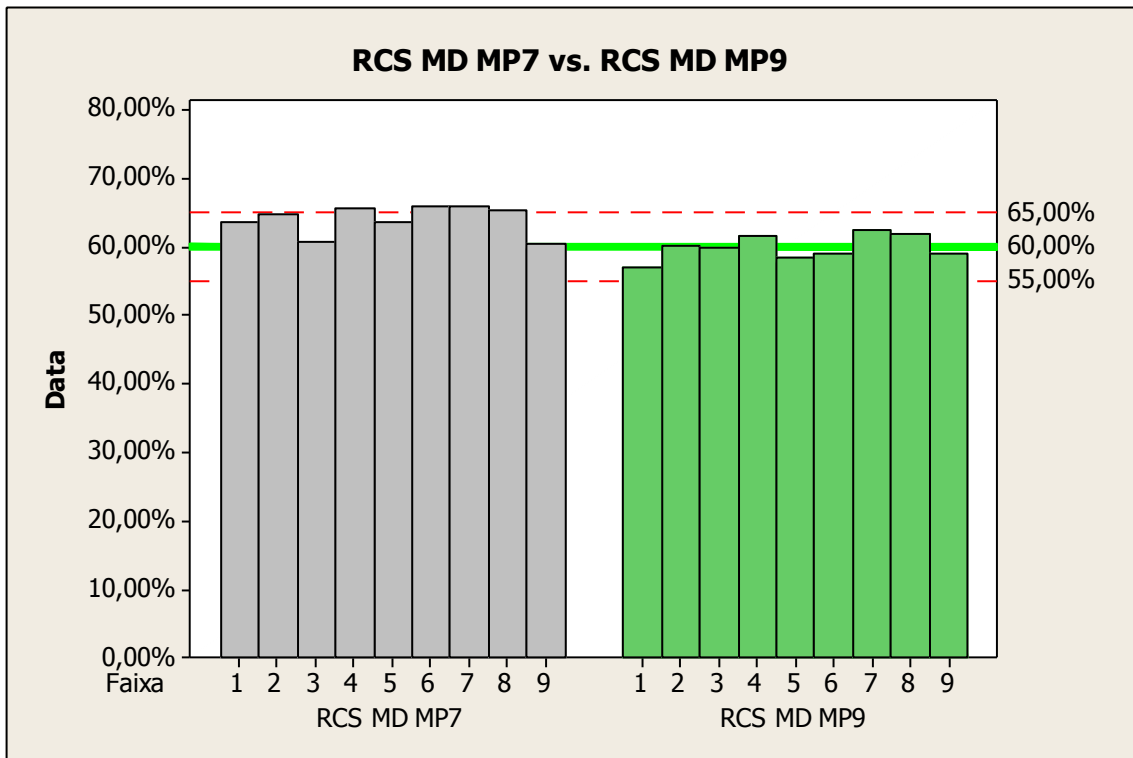


FIGURA 6.5 - RCS MD DA MP-7 E DA MP-9

6.3 AVALIAÇÃO EM MICROTOMÓGRAFO DE RAIOS X DAS AMOSTRAS DA MP-7 E MP-9 UTILIZADAS NO TESTE INDUSTRIAL REALIZADO NO NOVO VINCADOR

Análises de microtomografia de raios X foram realizadas nas amostras da MP-7 e MP-9 utilizadas no teste industrial no novo vincador.

A FIGURA 6.6 apresenta uma microtomografia dos vincos longitudinais e transversais do papelcartão produzido na MP-7 utilizado no teste industrial do novo vincador. Pode-se observar delaminação discreta entre as camadas de fibra. Já na FIGURA 6.7 a microtomografia dos vincos longitudinais e transversais do papelcartão produzido na MP-9 evidencia maior delaminação com estratificação das diversas camadas fibrosas.

A delaminação mais intensa facilita o processo de dobra, pois há redução da resistência à flexão na área do vinco.

Na FIGURA 6.8 apresenta-se a microtomografia do papelcartão da MP-7 do teste com *Ply Bond* mais baixo. Neste teste o *RCS MD* apresentou redução significativa nas bobinas de menor *Ply Bond*, comprovado pela maior delaminação entre camadas.

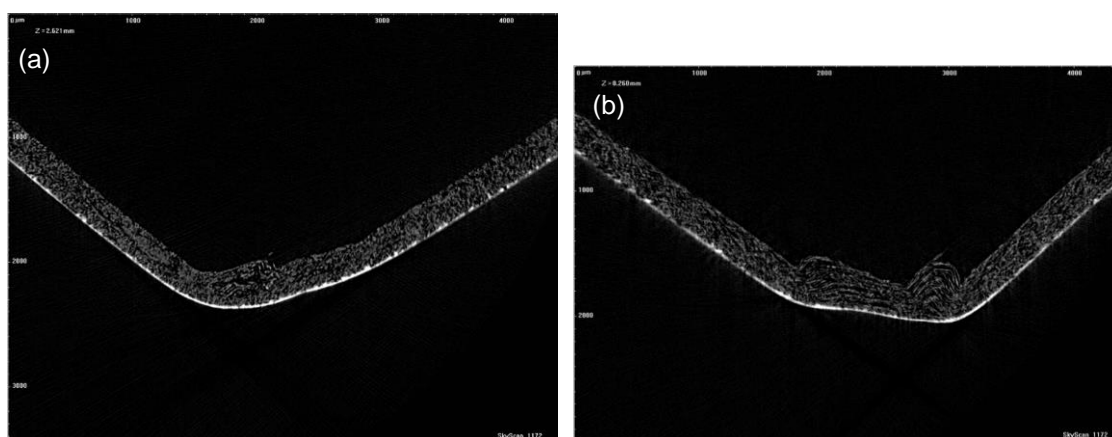


FIGURA 6.6 - PAPELCARTÃO DA MP-7 - VINCO LONGITUDINAL À ESQUERDA E VINCO TRANSVERSAL À DIREITA

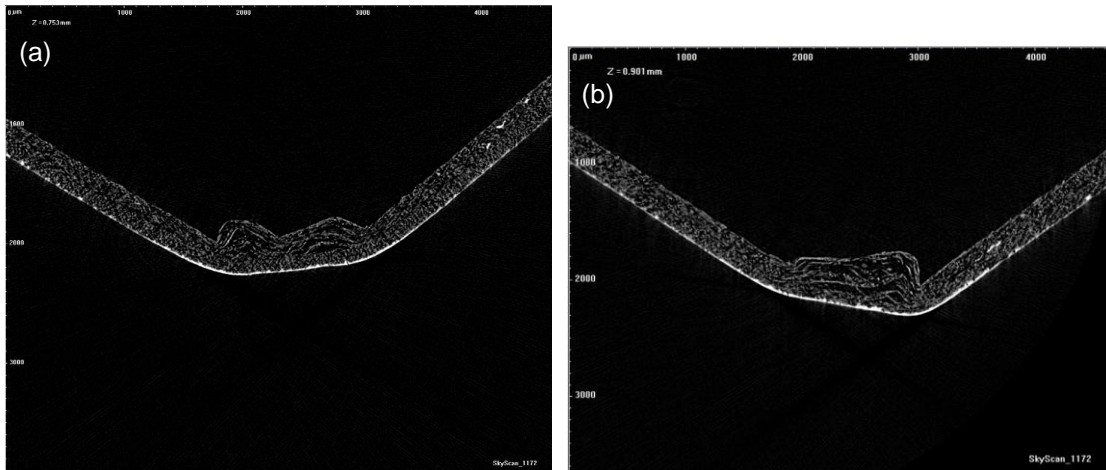


FIGURA 6.7 - PAPELCARTÃO DA MP-9 - VINCO LONGITUDINAL À ESQUERDA E VINCO TRANSVERSAL À DIREITA

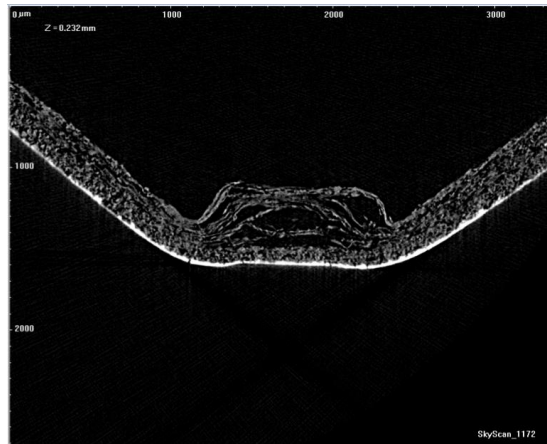


FIGURA 6.8 - PAPELCARTÃO DA MP-7 COM PLY BOND MAIS BAIXO - VINCO LONGITUDINAL, COM MAIOR ESTRATIFICAÇÃO ENTRE AS CAMADAS FIBROSAS.

6.4 AVALIAÇÃO DO VOLUME DE POROS EM MICROTOMÓGRAFO

Nas FIGURAS 6.9 a 6.11 a região de interesse de cada uma das amostras está destacada em vermelho e representa a região afetada pelo vinco, onde ocorre a delaminação do papelcartão durante a dobra.

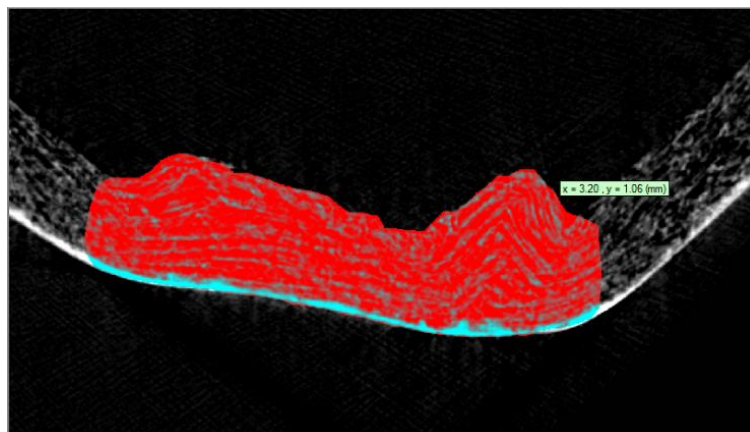


FIGURA 6.9 - REGIÃO DE INTERESSE DO PAPELCARTÃO DA MP-7, VINCO TRANSVERSAL.

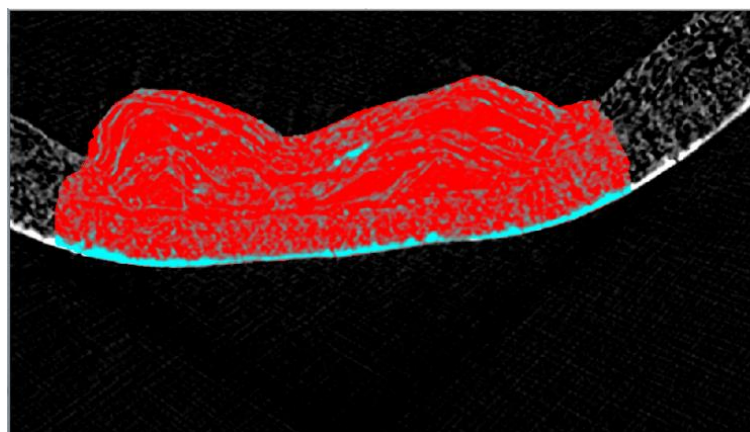


FIGURA 6.10 - REGIÃO DE INTERESSE DO PAPELCARTÃO DA MP-9, VINCO LONGITUDINAL.

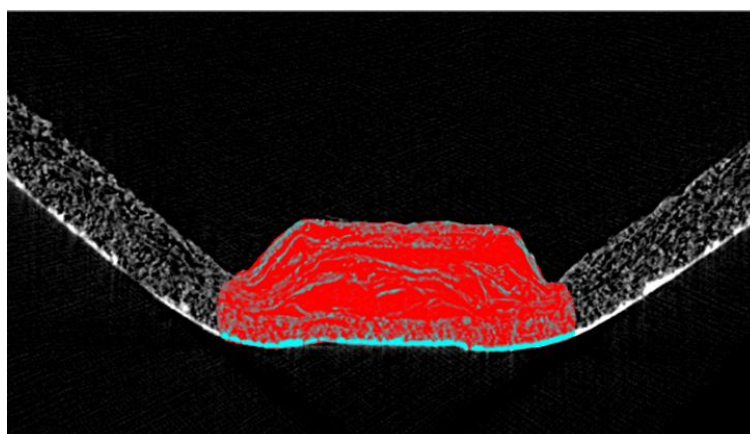


FIGURA 6.11 - REGIÃO DE INTERESSE DO PAPELCARTÃO DA MP-7 COM PLY BOND MAIS BAIXO, VINCO LONGITUDINAL.

Os parâmetros obtidos da análise da região de interesse de cada amostra estão na TABELA 6.2.

TABELA 6.2 - PARÂMETROS DA ANÁLISE EM MICROTOMÓGRAFO

Parâmetros do microtomógrafo	Unidade	Papelcartão da MP-7, vinco transversal		Papelcartão da MP-9, vinco longitudinal		Papelcartão da MP-7, vinco longitudinal Ply Bond baixo	
		Fase poro	Fase papel	Fase poro	Fase papel	Fase poro	Fase papel
Número de camadas	-	2459	2459	2459	2459	2459	2459
Menor posição vertical	mm	0,22	0,22	0,23	0,23	0,22	0,22
Maior posição vertical	mm	4,82	4,82	4,99	4,99	4,82	4,82
Tamanho do pixel	um	1,87	1,87	1,93	1,93	1,87	1,87
Menor configuração de cinza	-	0	49	0	49	0	49
Maior configuração de cinza	-	49	255	49	255	49	255
Volume de interesse total	mm ³	2,34	2,34	2,3	2,3	2,55	2,55
Volume do objeto	mm ³	1,44	0,92	1,46	0,85	1,66	0,91
Percentual do volume do objeto	%	61,69	39,12	63,62	36,95	64,89	35,54
Superfície do volume de interesse total	mm ²	19,44	19,44	19,48	19,48	17,09	17,09
Superfície do objeto	mm ²	197,18	197,40	206,47	207,42	160,5	165,5
Superfície de intersecção	mm ²	9,60	8,40	8,85	8,78	5,62	10,32
Superfície do objeto/volume do objeto	mm	136,56	215,57	141,3	244,41	96,93	182,49
Densidade da superfície do objeto	mm	84,24	84,33	89,89	90,31	62,9	64,86
Índice de convexidade da superfície	mm	-110,07	3,79	-119,61	8,68	-56,45	-20,75
Centroide (x)	mm	2,55	2,58	2,43	2,44	1,85	1,83
Centroide (y)	mm	1,02	0,96	1,82	1,78	1,14	1,07
Centroide (z)	mm	2,49	2,5	2,51	2,57	2,51	2,52
Razão percentual do volume de poros dividido pelo volume total dentro da região de interesse	%	61		63		64	

A análise foi realizada em alta resolução, desta forma a diferença encontrada na razão de volume de poros pelo volume total dentro da região de interesse é significativa. Pode-se dizer que a amostra de 64% da MP-7 com *Ply bond* baixo apresenta um volume maior de espaços vazios do que as demais amostras na área do vinco, devido à delaminação mais intensa comparativamente às outras amostras.

A amostra da MP-7, vinco transversal apresenta o menor volume de poros e a amostra da MP-9, vinco longitudinal apresenta volume de poros similar à amostra da MP-7 com *Ply Bond* baixo, resultado esperado já que o papelcartão da MP-9 apresenta bons resultados de vincagem.

Vale ressaltar que os parâmetros da análise em microtomógrafo foram obtidos na área do vinco, sem interferência de cortes da amostra com estilete ou tesoura. Desta forma a amostra mantém-se íntegra, sem amassamento causado por corte.

7 CONCLUSÕES

A avaliação individual das medições do momento de flexão do vinco e papelcartão não vincado revelaram um comportamento nunca antes observado. Alterações do momento de flexão do cartão determinam o valor de RCS em detrimento do vinco que se mantém mais estável.

O método de análise de RCS a 30° não pode ser aplicado a todo papelcartão para embalagem de líquidos. A formação do papelcartão em caixa de entrada *Beloit StrataFlow* diferencia-se da formação do papelcartão de três caixas de entrada separadas, desta forma observou-se que as medições de momento de flexão realizadas no papelcartão produzido com StrataFlow da máquina 7 apresentaram pico após 30° nos vincos transversais. As medições de momento de flexão realizadas no papelcartão produzido com StrataFlow da máquina 7 apresentaram pico após 30° e desta forma a análise de RCS 30° não é adequada para este tipo de formação.

A medição de momento de flexão do papelcartão não vincado a 30° apresenta alta variabilidade e impacta significativamente os resultados de RCS.

As ferramentas *Regression* e *Best subsets regression* do Minitab® 16 foram utilizadas para definir quais propriedades apresentam maior impacto sobre RCS. A propriedade *Ply Bond* apareceu como relevante em ambas as avaliações e foi a propriedade selecionada para realização de dois testes industriais: papelcartão com alto e baixo *Ply Bond*.

Comprovou-se em teste industrial o impacto do *Ply Bond* sobre a vincagem e RCS. Altos valores de *Ply Bond* prejudicam a delaminação interna necessária para uma boa vincagem, ao mesmo tempo deve ser controlada para que não haja delaminação durante os processos de conversão. Com base no teste industrial foi proposta alteração da especificação de *Ply Bond*, com redução do nominal para 180 J/m² para este produto.

A microtomografia de raios X do papelcartão da MP-7 com valores de RCS mais altos confirma a menor delaminação entre camadas comparativamente ao papelcartão da MP-9, efeito não observado nas amostras com *Ply Bond* baixo, onde a delaminação interna é mais intensa.

A utilização do microtomógrafo de raios X permitiu uma avaliação da área interna do vinco sem destruir a estrutura do mesmo e representa uma opção interessante a ser explorada em outros trabalhos, como investigação de trincas no papelcartão, por exemplo.

Flutuações no resultado da medida dos parâmetros da análise em microtomógrafo foram minimizadas com a seleção do tamanho do pixel, em alta resolução. Outro fator importante é que a região de interesse não é a mesma para todas as posições, pode-se ter alguma imprecisão na montagem da mesma, por exemplo, por selecionar uma área maior do que a interface da amostra.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados obtidos é possível sugerir para trabalhos futuros:

- Avaliar o efeito da umidade do papelcartão durante a vincagem, considerar impacto da durante transporte e conversão;
- Realizar comparativo de medição de *RCS* realizado em equipamento L&W e fator de dobra em equipamento Marbach;
- Avaliar a aplicabilidade do microtomógrafo de raios X em análise de trincas observadas em amostras com *RCS* acima do especificado.

REFERÊNCIAS

ALLAOUI, S.; ABOURA, Z.; BENZEGGAGH, M. **Phenomena governing uni-axial tensile behaviour of paperboard and corrugated cardboard.** Composite Structures, Elsevier, p. 1-2, 2009.

ALBERIUS, D.; GERSTNER F., **Investigation of creases. How the crease is affected by displaced crease plates.** Dissertação de Mestrado, Mechanical Design department of Design Sciences, Lund University, Suécia, p. 2, 5-6, 2010.

BEEEX, L.; PEERLINGS, R. **An experimental and computational study of laminated paperboard creasing and folding.** Int. J. Solids Struct. 61, p. 1-48, 2009.

BEEEX, L.; PEERLINGS, R. **On the influence of delamination on laminated paperboard creasing and folding.** Department of Mechanical Engineering, Eindhoven University of Technology, Philosophical Transactions of the Royal Society A 370, p. 1912–1924, 2012.

BERNI, M.; BAJAY, S.; GORLA, F. **Oportunidades de eficiência energética para a indústria: Setor Papel e Celulose,** CNI, Brasília, 2010.

BORGQVIST, E. **Continuum modeling of the mechanical properties of paperboard.** Department of Construction Sciences, Solid Mechanics, Lund University, Suécia, 2014.

BRACELPA. Associação Brasileira de Celulose e Papel. **História.** <http://bracelpa.org.br/bra2/?q=node/170>. Acesso realizado em 20/05/2014.

CARLSSON, L.; FELLERS, C.; RUVO, A. **The mechanism of failure in bending of paperboard.** Journal of Material Science 15, p. 2636 - 2642, 1980.

DEGANUTTI, F. **Estudo da Seção de Secagem de Papel da Máquina MP-7 da Klabin/PR.** Departamento de Engenharia Química. Universidade Estadual de Maringá, 2001.

FELLERS, C.; ÖSTLUND, S.; MÄKELÄ, P. **Evaluation of the Scott bond test method.** Nordic Pulp and Paper Research Journal Vol. 27, no.2, p. 231-236, 2012

GIAMPIERI, A.; PEREGO, U.; BORSARI, R. **A constitutive model for the mechanical response of the folding of creased paperboard.** International Journal of Solids and Structures, Volume 48, Issues 16–17, p. 2275–2287, 2011.

HUANG, H., **Folding of Paperboard.** Dissertação de Mestrado, Department of Solid Mechanics, Royal Institute of Technology (KTH) Estocolmo, Suécia, p. 5-25, 2008.

HUANG, H., **Numerical and Experimental Investigation of Paperboard Creasing and Folding.** Tese de Licenciatura N° 111, Department of Solid Mechanics, Royal Institute of Technology (KTH) Estocolmo, Suécia, p. 12-26, 2011.

HUANG, H.; HAGMAN, A.; Nygard, M. **Quasi static analysis of creasing and folding for three paperboards.** Elsevier, Mechanics of Materials 69, p. 11-34, 2014

IGGESUND PAPERBOARD. **The paperboard process.** Products.iggesund.com, 2014

ISAKSSON P., GRADIN P. & ÖSTLUND S. **A simplified treatise of the Scott bond testing method.** Proceedings of the 2007 International Paper Physics Conference, Gold Coast, Qld, Australia, 1-6, 2007

JUST, M.; PALSON M. **Roller-Nip influence on crease geometry and bending stiffness.** Dissertação de Mestrado, Division of Solid Mechanics, Lund University, Suécia, p. 2, 5-6, 2003.

KLABIN. **Treinamento de produção de papel.** Relatório interno, 2010.

KOUBAA, A.; KOURAN, Z. **Measure of the internal bond strength of paperboard.** TAPPI Journal, v.78, p. 103-111, 1995

LILLIENBERG, J.; LÖRD, E. **Outside vs. inside creasing – A parameter study.** Dissertação de Mestrado, Division of Solid Mechanics, Lund University, Suécia, p.2, 2009.

MAKELA, P.; ÖSTLUND, S. **Orthotropic elastic–plastic material model for paper materials.** International Journal of Solids and Structures 40 (21), 5599–5620, 2003.

MARBACH. www.en.marbach.com.br. Acesso realizado em 10/08/2014.

MENTRASTI, L.; CANELLA, F.; PUPILLI, M.; DAI, J. **Large bending behavior of creased paperboard.** International Journal of Solids and Structures. Volume 50, Issues 20–21, p. 3089–30961, 2013.

MFOUMOU, E. **Remote acoustic material characterization of thin sheets.** Blekinge Institute of Technology, Suécia, Licentiate Dissertation Series No. 2006:09, p.1, 2006.

NAGASAWA, S.; FUKUZAWA, Y.; YAMAGUCHI, D.; NAGAE, S.; KATAYAMA, I.; YOSHIZAWA, A. **Deformation characteristics on creasing of paperboard under shallow indentation.** Department of Mechanical Engineering, Nagaoka University of Technology, Japão, ICF100202OR, p.1-6, 2001.

NAGASAWA, S.; ENDO, R.; FUKUZAWA, Y.; UCHINO, S.; KATAYAMA, I. **Creasing characteristic of aluminum foil coated paperboard.** Journal of Materials Processing Technology, Volume 201, Issues 1-3, p. 401-407, 2008.

NIST/SEMATECH – NATIONAL INSTITUTE . **E-Handbook of Statistical Methods.** <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/>, 2012.

NYGARDS, M. **Rate effects during rotary die creasing. Testing of paperboards with different ZD compression properties.** Innventia report n° 416, 2013.

RUTHES, S.; CERETTA, P.; Sonza, I. **Seis Sigma: melhoria da qualidade através da redução da variabilidade.** Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, ISSN 1808-0448 / v. 02, n. 02: p. 173-190, 2006.

PEREGO, U.; GIAMPIERI, A. **An interface element to model the mechanical response of crease lines for carton-based packaging.** Department of Structural Engineering, Politecnico di Milano, Itália, p. 1-10, 2013.

SEBES, A., **Investigation of paperboard properties and their influence on creasing and folding.** Dissertação de Mestrado, Department of Solid Mechanics, Royal Institute of Technology (KTH) Estocolmo, Suécia, p. 44-82, 2010.

STENBERG, N., **Mechanical properties in the thickness direction of paper and paperboard.** Tese de Doutorado, Department of Solid Mechanics, Royal Institute of Technology (KTH) Estocolmo, Suécia, p. 9-17, 1999.

STENBERG, N., **On the out of plane mechanical behavior of paper materials.** Tese de Doutorado, Department of Solid Mechanics, Royal Institute of Technology (KTH) Estocolmo, Suécia, p. 5-7, 2002.

TRYDING J.; ROSANDER J.; JUST M. **Tetra Pak Packaging Solutions AB MEMO,** Base Materials, Suécia, Janeiro 18, 2007 1 (12).

TRYDING, J. **Folding of Paperboard using the L&W Bending Tester.** Draft Version 2.0.3, Tetra Pak, Suécia, p. 3, 2012.

WALTER, S. **On the fracture of thin laminates.** Department of Mechanical Engineering. Blekinge Institute of Technology, Suécia, Dissertation Series No. 2004:07, p. 1-3, 2004.

WALTER, S.; LEVIN, V.; PETRONYUK, J.; MFOUMOU, E.; WALTER, M. **Acoustic imaging internal microstructure of a packaging material.** XV Int. conf. on Mech. Of Comp. Mat., Riga, 2008.

XIA, Q.S. **Mechanics of inelastic deformation and delamination in paperboard.** Ph.D. Thesis; Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, Estados Unidos, 2002.

APÊNDICE

Medição de profundidade de vinco no equipamento Taylor Hobson Talysurf.

O equipamento Talysurf CLI 2001 da Taylor Hobson é utilizado para caracterização do perfil superficial do papelcartão. Possui alta resolução e foi utilizado na medição da profundidade do vinco.

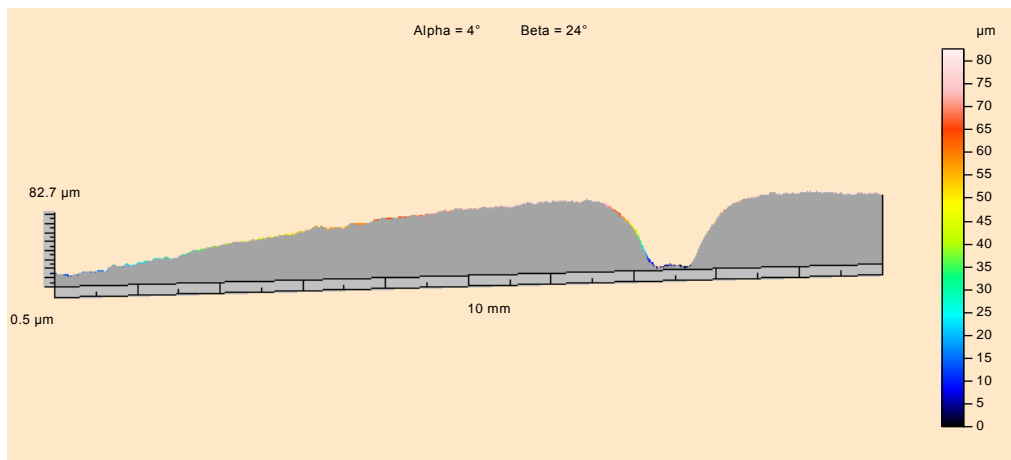


FIGURA 1 – PERFIL DE VINCO LONGITUDINAL MEDIDO NO EQUIPAMENTO TALYSURF.

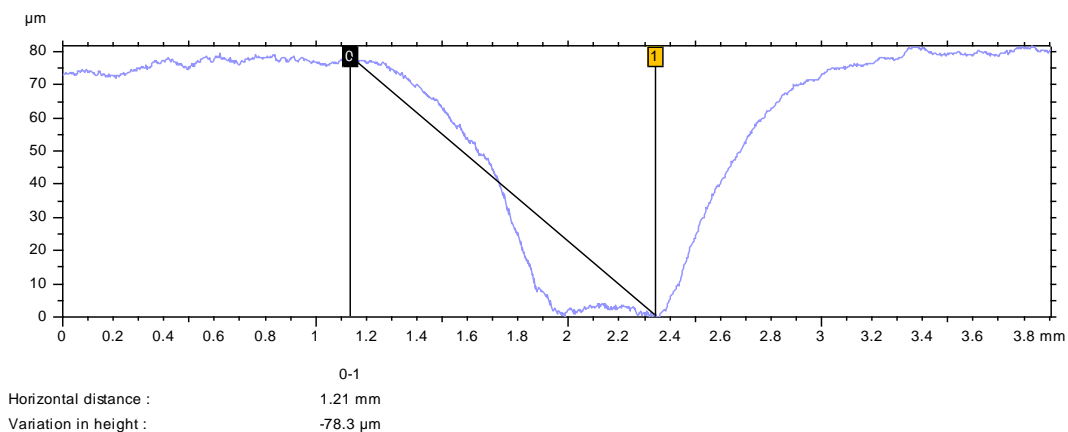


FIGURA 2 – MEDIÇÃO DA PROFUNDIDADE DO VINCO LONGITUDINAL EM EQUIPAMENTO TALYSURF.

Medição de *Scott Bond* ou *Ply Bond* em papelcartão

Método TAPPI T 569 om-14 para medição de *Scott Bond* de papelcartão.

De acordo com Koubba (1995) a nível microscópico a resistência à delaminação depende do número de interações entre fibras, área superficial de contato e resistência específica de cada interação.

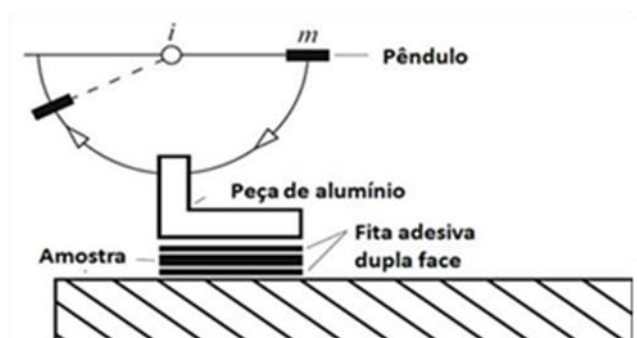


FIGURA 3 – MEDIÇÃO DE SCOTT BOND CONFORME TAPPI T 569 OM-14 (ISAISON, 2010).