

JOÃO TELÉSFORO NÓBREGA DE MEDEIROS

**FADIGA DE CONTATO
DE DISCOS METÁLICOS NÃO-CONFORMES
SUBMETIDOS A ENSAIOS A SECO
DE ROLAMENTO CÍCLICO**

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

v. 2

**CONSULTA
FT-1710
v.2**

**SÃO PAULO
2002**

JOÃO TELÉSFORO NÓBREGA DE MEDEIROS

**FADIGA DE CONTATO
DE DISCOS METÁLICOS NÃO-CONFORMES
SUBMETIDOS A ENSAIOS A SECO
DE ROLAMENTO CÍCLICO**

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

**Área de Concentração:
Engenharia Mecânica**

**Orientador:
Prof. Titular
Dr. Deniol Katsuki Tanaka**

v. 2

SÃO PAULO

2002

Sumário (Volume I)

	Página
1. Introdução	1
1.1. Considerações iniciais	1
1.2. O desgaste de rolamento	3
1.3. Objetivos	6
1.3.1. Objetivo Geral	6
1.3.2. Objetivos Específicos	6
2. Revisão da Literatura	7
2.1. Irreversibilidade na relação com o outro	7
2.2. Estudos do contato estático e do desgaste de sólidos sob rolamento até o século XIX	8
2.3. Estudos sobre irreversibilidade e resistência ao rolamento no século XX	14
2.4. Desgaste de materiais devido ao contato cíclico	28
2.4.1. Engenharia de projeto de superfícies de contato	28
2.4.2. Mecanismos de desgaste de materiais sob contato de rolamento	33
2.4.2.1. Desgaste, microdeformação, adesão e aderência	33
2.4.2.2. Mecanismos metalúrgicos	37
2.4.2.3. Mecanismos geométricos e operacionais	41
2.4.2.4. Mecanismos hidrodinâmicos	50
2.4.2.5. Mecanismos das pequenas trincas	52
2.4.2.6. Mecanismos acústicos do colapso e do desgaste	54
2.5. Emissão acústica e nível de pressão sonora (NPS) do contato cíclico seco de rolamento	54
2.5.1. O envelope e o sinal acústico no domínio do tempo	55
2.5.2. O sinal acústico no domínio da frequência	57
2.5.2.1. Contato de rolamento em escala atômica	57
2.5.2.2. Contato de rolamento em escala micrométrica	58
2.5.3. Medida da intensidade do som	60
2.5.3.1. Modelagem da vazão e pressão de ar em um tubo e efeito da estricção	61
2.5.3.2. Interação fluido e superfície de contato	64
2.5.3.3. Modelagem do sinal de pressão de ar em um sistema dinâmico	66
2.6. Detecção de danos de desgaste em sólidos por SLM	67

Sumário (Volume I) (continuação)

	Página
3. Reflexões Metodológicas, Materiais e Métodos	71
3.1. Introdução	71
3.2. Formalizando o método e a hipótese central	75
3.3. Materiais	82
3.3.1. Aço AISI 52100 (DIN 100Cr6)	83
3.3.2. Aço AISI M2	92
3.3.3. Ferro Fundido Nodular Austemperado (ADI) Nitretado	100
3.3.4. Aço AISI 1045 nitretado a plasma	103
3.3.5. Cobre eletrolítico comercial	103
3.4. Métodos desenvolvidos e utilizados	105
3.4.1. Ensaios tribológicos de rolamento a seco	105
3.4.2. Dispositivos e procedimentos desenvolvidos para avaliar a resposta do material ao rolamento cíclico	110
3.5. Planejamento dos ensaios disco disco	117
4. Resultados	122
4.1. Resposta da aquisição do NPS [dB] por microcomputador	123
4.1.1. Primeiro corpo de Aço AISI M2 e antagonista de Aço AISI 52100 ou ADI nitretado	123
4.1.1.1. Ensaios M231, M232, M233 e M239 (Aços AISI M2 e 52100 OQT)	123
4.1.1.2. Ensaios M234, M235, M236, M237 e M238 (Aços AISI M2 e ADI nitretado)	130
4.1.2. Primeiro corpo e disco antagonista de Aço M2	138
4.2. Resposta do NPS [dB] associado à pressão de Hertz $p_{o\text{máx}}$ para primeiro corpo de Aço AISI M2 e antagonista de Aço AISI 52100 ou ADI nitretado	141
4.3. Danos constatados em algumas pistas desgastados e colapsos em C.P. “Chevron” e “Flexão três pontos”	145
4.3.1. Evidências de microscopia e ensaios mecânicos	145
4.3.2. Evidências ou gênese de mecanismos de desgaste em discos rolantes sob carga mecânica e/ou térmica	159
4.4. Evolução do desgaste e variação de parâmetros de análise de superfície em ensaios de Aços AISI M2 versus AISI 52100	169
4.4.1. Desvios de circularidade e batimento radial	169
4.4.2. Parâmetros híbridos R_k	170

Sumário (Volume I) (continuação)

	página
4. Resultados (continuação)	
4.5. Variação da carga normal e resposta do NPS [dB] em ensaios ADI-ADI e Aço AISI 52100-ADI	173
4.5.1. Ensaios Aço AISI 52100-Ferro Fundido Nodular Austemperado e Nitretado (ADI)	174
4.5.2. Ensaios ADI-ADI	175
4.6. Partículas desprendidas das pistas	176
4.7. Sinopse das grandezas macroscópicas avaliadas nos ensaios de rolamento cíclico disco-disco	179
5. Discussão	185
5.1. Introdução	185
5.2. Regimes de desgaste por contato de rolamento cíclico	189
5.3. Vida de um par tribológico de rolamento cíclico	191
5.3.1. Modelagem determinística da vida de um contato	191
5.3.2. Critérios de colapso do contato de rolamento	194
5.4. Irreversibilidades na relação com o outro	218
5.4.1. Unidades adjacentes compondo um material	218
5.4.2. Trincas em série e em paralelo	219
5.4.3. Delimitação de campo de modelagem do desgaste por rolamento cíclico	221
5.5. Perturbações no contato de rolamento	222
5.6. Taxa de produção de entropia associada à fadiga de contato e outros mecanismos de dano por contato	227
5.7. Hipótese das elipses limites e o mapa RW de desgaste por rolamento cíclico	230
6. Conclusões	236
6.1. Sugestões para trabalhos futuros	239

Sumário (Volume II)

Anexo A. Procedimentos de manufatura e extração de corpos-de-prova (C.P.) para análise	240
A.1. Retificação das superfícies esféricas	240
A.2. Extração, por eletroerosão, de amostras dos discos ensaiados para manufatura de C.P. com entalhe “chevron”	246
A.3. Retificação final dos C.P. com entalhe “Chevron”	249
Anexo B. Aferição e calibração do sistema de medida da temperatura de contato por pirômetro óptico	252
B.1. Pirômetro óptico da máquina de ensaio disco-disco	252
B.2. Sistema de aferição da medida do pirômetro em um campo de temperatura	253
B.3. Evidências dos efeitos térmicos de alta temperatura	258
Anexo C. Aferição do decibelímetro (SPM)	262
C.1. Apresentação do sistema	262
C.2. Metodologia	264
C.3. Caracterização dos sinais de entrada/saída na aferição	264
C.4. Resposta do Medidor de Pressão Sonora (“Sound Pressure Meter” [SPM]) ou decibelímetro, às entradas sonoras	281
C.5. Avaliação do erro experimental de medida do nível de pressão sonora (NPS)	286
Anexo D. Resultados dos ensaios disco-disco	288
Anexo E. Contato de Hertz	488
Bibliografia	492

LISTA DE FIGURAS – Volume II

Fig.	Assunto apresentado	Pág.
119	Retificação cilíndrica em processo das superfícies esféricas dos discos	241
120	Processo de medida do batimento radial da sede de fixação dos discos	242
121	Fixação dos discos de ensaio na sede	243
122	Processo de retificação e de fixação dos discos	243
123	Inspeção e medição final dos discos e desmagnetização após usinagem	244
124	Acondicionamento de discos novos oriundos da manufatura e após ensaios	244
125	Tensão residual em discos de Aço AISI52100 após retificação plana	245
126	de perfil	245
127	Esboço do corpo-de-prova com entalhe “Chevron”	247
128	Aspectos da usinagem eletroerosiva na retirada e blanques dos discos	248
129	Dispositivos para posicionamento de peças a retificar entalhe “Chevron”	249
130	Detalhes do posicionamento de quatro peças a retificar – “Chevron”	250
131	Fotos do vértice de um “Chevron” após fratura	251
132	Sistema desenvolvido para aferição do pirômetro óptico	254
133	Quartis da temperatura e leituras do pirômetro óptico e termopares	255
134	Modelos de ajuste correlacionando as medidas de temperatura	257
135	Correlação provável entre medida do pirômetro e temperatura de pico	258
136	Morfologia de dano em pista de disco motor de Aço 52100	260
137	Decaimento exponencial da temperatura da sala após ensaio disco-disco	261
138	Esquema do sistema de aquisição de dados e aferição do decibelímetro	262
139	Foto do sistema de aferição do decibelímetro	263
140	Densidade espectral de potência (DEP), entrada e saída, medida M1	265
141	Correlação cruzada da DEP entrada-saída e resposta em frequência, M1	266
142	Densidade espectral de potência (DEP), entrada e saída, medida M2	267
143	Correlação cruzada da DEP entrada-saída e resposta em frequência, M2	268
144	Densidade espectral de potência (DEP), entrada e saída, medida M3	269
145	Correlação cruzada da DEP entrada-saída e resposta em frequência, M3	270
146	Densidade espectral de potência (DEP), entrada e saída, medida M4	271
147	Correlação cruzada da DEP entrada-saída e resposta em frequência, M4	272
148	Densidade espectral de potência (DEP), entrada e saída, medida M5	273
149	Correlação cruzada da DEP entrada-saída e resposta em frequência, M5	274
150	Densidade espectral de potência (DEP), entrada e saída, medida M6	275
151	Correlação cruzada da DEP entrada-saída e resposta em frequência, M6	276
152	Densidade espectral de potência (DEP), entrada e saída, medida M7	277
153	Correlação cruzada da DEP entrada-saída e resposta em frequência, M7	278
154	Densidade espectral de potência (DEP), entrada e saída, medida M8	279
155	Correlação cruzada da DEP entrada-saída e resposta em frequência, M8	280
156	Diagrama do medidor do nível de pressão sonora da bancada experimental	281

Fig.	Assunto apresentado	Pág.
157	Resposta sonora no domínio da frequência na medida M1 (0,1 Volt)	282
158	M2 (0,5 Volt)	282
159	M3 (1,0 Volt)	283
160	M4 (2,0 Volts)	283
161	M5 (3,0 Volts)	284
162	M6 (4,0 Volts)	284
163	M7 (5,0 Volts)	285
164	M8 (5,0 Volts)	285
165	Resposta sonora no domínio da frequência e a tensão elétrica de entrada	286
166	Umidade e temperatura (Aços M2 e 52100, ensaio M231)	289
167	Carga normal e velocidade (Aços M2 e 52100, ensaio M231)	290
168	NPS [dB] e deslizamento (Aços M2 e 52100, ensaio M231)	291
169	Perda mássica (Aços M2 e 52100, ensaio M231)	292
170	Umidade e temperatura (Aços M2 e 52100, ensaio M232)	293
171	Carga normal e velocidade (Aços M2 e 52100, ensaio M232)	294
172	NPS [dB] e deslizamento (Aços M2 e 52100, ensaio M232)	295
173	Perda mássica (Aços M2 e 52100, ensaio M232)	296
174	Umidade e temperatura (Aços M2 e 52100, ensaio M233)	297
175	Carga normal e velocidade (Aços M2 e 52100, ensaio M233)	298
176	NPS [dB] e deslizamento (Aços M2 e 52100, ensaio M233)	299
177	Perda mássica (Aços M2 e 52100, ensaio M233)	300
178	Desgaste de pistas de Aço AISI M2 e 52100	301
179	Umidade e temperatura (Aços M2 e 52100, ensaio M239)	302
180	Carga normal e velocidade (Aços M2 e 52100, ensaio M239)	303
181	NPS [dB] e deslizamento (Aços M2 e 52100, ensaio M239)	304
182	Perda mássica (Aços M2 e 52100, ensaio M239)	305
183	Umidade e temperatura (Aço M2 e ADI nitretado, ensaio M234)	306
184	Carga normal e velocidade (Aço M2 e ADI nitretado, ensaio M234)	307
185	NPS [dB] e deslizamento (Aço M2 e ADI nitretado, ensaio M234)	308
186	Perda mássica (Aço M2 e ADI nitretado, ensaio M234)	309
187	Umidade e temperatura (Aço M2 e ADI nitretado, ensaio M235)	310
188	Carga normal e velocidade (Aço M2 e ADI nitretado, ensaio M235)	311
189	NPS [dB] e deslizamento (Aço M2 e ADI nitretado, ensaio M235)	312
190	Perda mássica (Aço M2 e ADI nitretado, ensaio M235)	313
191	Umidade e temperatura (Aço M2 e ADI nitretado, ensaio M236)	314
192	Carga normal e velocidade (Aço M2 e ADI nitretado, ensaio M236)	315
193	NPS [dB] e deslizamento (Aço M2 e ADI nitretado, ensaio M236)	316
194	Perda mássica (Aço M2 e ADI nitretado, ensaio M236)	317
195	Desgaste de pistas de discos de ADI após rolarem em Aço M2)	318
196	Umidade e temperatura (Aço M2 e ADI nitretado, ensaio M237)	319
197	Carga normal e velocidade (Aço M2 e ADI nitretado, ensaio M237)	320
198	NPS [dB] e deslizamento (Aço M2 e ADI nitretado, ensaio M237)	321

Fig.	Assunto apresentado	Pág.
199	Perda mássica (Aço M2 e ADI nitretado, ensaio M237)	322
200	Umidade e temperatura (Aço M2 e ADI nitretado, ensaio M238)	323
201	Carga normal e velocidade (Aço M2 e ADI nitretado, ensaio M238)	324
202	NPS [dB] e deslizamento (Aço M2 e ADI nitretado, ensaio M238)	325
203	Perda mássica (M2-38MR e ADI205)	326
204	Gabinete disco-disco e papel porta-partículas de desgaste após ensaio	327
205	Umidade e temperatura (Aços M2, ensaio M240)	328
206	Carga normal e velocidade (Aços M2, ensaio M240)	329
207	NPS [dB] e deslizamento (Aços M2, ensaio M240)	330
208	Perda mássica (Aços M2, ensaio M240)	331
209	Umidade e temperatura (discos de Aço 52100, ensaio ER89)	332
210	Carga normal e velocidade (discos de Aço 52100, ensaio ER89)	333
211	NPS [dB] e deslizamento(discos de Aço 52100, ensaio ER89)	334
212	Perda mássica (discos de Aço 52100, ensaio ER89)	335
213	Umidade e temperatura (discos de Aço 52100, ensaio ER80)	336
214	Carga normal e velocidade (discos de Aço 52100, ensaio ER80)	337
215	NPS [dB] e deslizamento(discos de Aço 52100, ensaio ER80)	338
216	Perda mássica (discos de Aço 52100, ensaio ER80)	339
217	Evolução do desgaste de pistas, discos de Aço 52100, ensaio ER80	340
218	Umidade e temperatura (discos de Aço 52100, ensaio ER61)	341
219	Carga normal e velocidade (discos de Aço 52100, ensaio ER61)	342
220	NPS [dB] e deslizamento(discos de Aço 52100, ensaio ER61)	343
221	Perda mássica (discos de Aço 52100, ensaio ER61)	344
222	Aspecto da seção após colapso da extremidade roscada do eixo-árvore	345
223	Umidade e temperatura (discos de Aço 52100, ensaio ER62)	346
224	Carga normal e velocidade (discos de Aço 52100, ensaio ER62)	347
225	NPS [dB] e deslizamento(discos de Aço 52100, ensaio ER62)	348
226	Perda mássica (discos de Aço 52100, ensaio ER62)	349
227	Umidade e temperatura (discos de Aço 52100, ensaio ER86)	350
228	Carga normal e velocidade (discos de Aço 52100, ensaio ER86)	351
229	NPS [dB] e deslizamento(discos de Aço 52100, ensaio ER86)	352
230	Perda mássica (discos de Aço 52100, ensaio ER86)	353
231	Trincas no meio e na borda de pista de Aço 52100, após 12,6 Megaciclos	354
232	Umidade e temperatura (discos de Aço 52100, ensaio ER87)	355
233	Carga normal e velocidade (discos de Aço 52100, ensaio ER87)	356
234	NPS [dB] e deslizamento(discos de Aço 52100, ensaio ER87)	357
235	Perda mássica (discos de Aço 52100, ensaio ER87)	358
236	Evidência de corrugação (poligonização) em pista de Aço 52100	359
237	Umidade e temperatura (discos de Aço 52100, ensaio ER88)	360
238	Carga normal e velocidade (discos de Aço 52100, ensaio ER88)	361
239	NPS [dB] e deslizamento(discos de Aço 52100, ensaio ER88)	362
240	Perda mássica (discos de Aço 52100, ensaio ER88)	363

Fig.	Assunto apresentado	Pág.
241	Visualização da pista ensaiada e do entalhe em disco de Aço 52100	364
242	Desgaste de pistas de discos de Aço 52100, cuja movida era entalhada	365
243	Umidade e temperatura (discos de Aço 52100, ensaio ER21)	366
244	Carga normal e velocidade (discos de Aço 52100, ensaio ER21)	367
245	NPS [dB] e deslizamento(discos de Aço 52100, ensaio ER21)	368
246	Perda mássica (discos de Aço 52100, ensaio ER21)	369
247	Desgaste de pistas de discos de Aço 52100, após $12,6 \times 10^6$ ciclos	370
248	Umidade e temperatura (discos de Aço 52100 e 1045, ensaio RN2)	371
249	Carga normal e velocidade (discos de Aço 52100 e 1045, ensaio RN2)	372
250	NPS [dB] e deslizamento(discos de Aço 52100 e 1045, ensaio RN2)	373
251	Perda mássica (discos de Aço 52100 e 1045, ensaio RN2)	374
252	Umidade e temperatura (discos de Aço 52100 e 1045, ensaio RN1)	375
253	Carga normal e velocidade (discos de Aço 52100 e 1045, ensaio RN1)	376
254	NPS [dB] e deslizamento(discos de Aço 52100 e 1045, ensaio RN1)	377
255	Perda mássica (discos de Aço 52100 e 1045, ensaio RN1)	378
256	Microtrinca em Aço após rolamento e ser submetido a ensaio “Chevron”	379
257	Microtrinca em Aço após rolamento e ser submetido a flexão 3 pontos	380
258	Microtrinca em Aço, seções sob tração e compressão	381
259	Umidade e temperatura (Aço 52100 e ADI nitretado, ensaio S03-ADI03)	382
260	Carga normal e velocidade (Aço 52100 e ADI nitretado, S03-ADI03)	383
261	NPS[dB] e deslizamento (Aço 52100 e ADI nitretado, ensaio S03-ADI03)	384
262	Perda mássica (Aço 52100 e ADI nitretado, ensaio S03-ADI03)	385
263	Umidade e temperatura (Aço 52100 e ADI nitretado, ensaio S05-ADI13)	386
264	Carga normal e velocidade (Aço 52100 e ADI nitretado, S05-ADI13)	387
265	NPS[dB] e deslizamento (Aço 52100 e ADI nitretado, ensaio S05-ADI13)	388
266	Perda mássica (Aço 52100 e ADI nitretado, ensaio S05-ADI13)	389
267	Umidade e temperatura (Aço 52100 e ADI nitretado, ensaio S07-ADI18)	390
268	Carga normal e velocidade (Aço 52100 e ADI nitretado, S07-ADI18)	391
269	NPS[dB] e deslizamento (Aço 52100 e ADI nitretado, ensaio S07-ADI18)	392
270	Perda mássica (Aço 52100 e ADI nitretado, ensaio S07-ADI18)	393
271	Umidade e temperatura (Aço 52100 e ADI nitretado, ensaio S02-ADI17)	394
272	Carga normal e velocidade (Aço 52100 e ADI nitretado, S02-ADI17)	395
273	NPS[dB] e deslizamento (Aço 52100 e ADI nitretado, ensaio S02-ADI17)	396
274	Perda mássica (Aço 52100 e ADI nitretado, ensaio S02-ADI17)	397
275	Umidade e temperatura (discos de ADI nitretado 02-04)	398
276	Carga normal e velocidade (discos de ADI nitretado 02-04)	399
277	NPS [dB] e deslizamento (discos de ADI nitretado 02-04)	400
278	Perda mássica (discos de ADI nitretado 02-04)	401
279	Umidade e temperatura (discos de ADI nitretado 05-06)	402
280	Carga normal e velocidade (discos de ADI nitretado 05-06)	403
281	NPS [dB] e deslizamento (discos de ADI nitretado 05-06)	404
282	Perda mássica (discos de ADI nitretado 05-06)	405

Fig.	Assunto apresentado	Pág.
283	Umidade e temperatura (discos de ADI nitretado 07-08)	406
284	Carga normal e velocidade (discos de ADI nitretado 07-08)	407
285	NPS [dB] e deslizamento (discos de ADI nitretado 07-08)	408
286	Perda mássica (discos de ADI nitretado 07-08)	409
287	Umidade e temperatura (discos de ADI nitretado 09-10)	410
288	Carga normal e velocidade (discos de ADI nitretado 09-10)	411
289	NPS [dB] e deslizamento (discos de ADI nitretado 09-10)	412
290	Perda mássica (discos de ADI nitretado 09-10)	413
291	Umidade e temperatura (discos de ADI nitretado 11-12)	414
292	Carga normal e velocidade (discos de ADI nitretado 11-12)	415
293	NPS [dB] e deslizamento (discos de ADI nitretado 11-12)	416
294	Perda mássica (discos de ADI nitretado 11-12)	417
295	Umidade e temperatura (discos de ADI nitretado 14-15)	418
296	Carga normal e velocidade (discos de ADI nitretado 14-15)	419
297	NPS [dB] e deslizamento (discos de ADI nitretado 14-15)	420
298	Perda mássica (discos de ADI nitretado 14-15)	421
299	Desgaste de pista de disco de ferro fundido nodular (ADI) nitretado	422
300	Umidade e temperatura (discos de ADI 19-20)	423
301	Carga normal e velocidade (discos de ADI 19-20)	424
302	NPS [dB] e deslizamento (discos de ADI 19-20)	425
303	Perda mássica (discos de ADI 19-20)	426
304	Umidade e temperatura (discos de Cobre e Aço, C01)	427
305	Carga normal e velocidade (discos de Cobre e Aço, C01)	428
306	NPS [dB] e deslizamento (discos de Cobre e Aço, C01)	429
307	Perda mássica (discos de Cobre e Aço, C01)	430
308	Umidade e temperatura (discos de Cobre e Aço, C02)	431
309	Carga normal e velocidade (discos de Cobre e Aço, C02)	432
310	NPS [dB] e deslizamento (discos de Cobre e Aço, C02)	433
311	Perda mássica (discos de Cobre e Aço, C02)	434
312	Umidade e temperatura (discos de Cobre e Aço, C03)	435
313	Carga normal e velocidade (discos de Cobre e Aço, C03)	436
314	NPS [dB] e deslizamento (discos de Cobre e Aço, C03)	437
315	Perda mássica (discos de Cobre e Aço, C03)	438
316	Desgaste de pista de disco de Cobre e Aço	439
317	Umidade e temperatura (discos de Aço 52100, ER85)	440
318	Carga normal e velocidade (discos de Aço 52100, ER85)	441
319	Taxa de aquecimento e relação de deslizamento (Aço 52100, ER85)	442
320	Perda mássica (discos de Aço 52100, ER85)	443
321	Microtrinca em pista de aço 52100, seção circunferencial	444
322	Aspecto de "microscuffing" por arraste de partícula na pista	444
323	Aspecto de microtrincas térmicas devido à eletroerosão do anel	445
324	Aspecto de "microspalling" na seção transversal da pista	446

Fig.	Assunto apresentado	Pág.
325	Trinca micrométrica subsuperficial por fadiga de contato	446
326	Umidade e temperatura (discos de Aço 52100, ER84)	447
327	Carga normal e velocidade (discos de Aço 52100, ER84)	448
328	Taxa de aquecimento e relação de deslizamento (Aço 52100, ER84)	449
329	Perda mássica (discos de Aço 52100, ER84)	450
330	Estado das pistas de aço 52100, após rolarem 1,14 Megaciclos	451
331	Estado das pistas de aço 52100, após rolarem 1,53 Megaciclos	451
332	Aspecto de “ <i>spalling</i> ” da pista de Aço 52100	452
333	Evidência de possível expulsão de “debris” e malhas de trincas térmicas	452
334	Microtrincas nas direções circunferencial e axial em pista de Aço 52100	453
335	Desgaste de pista de disco de Aço 52100	453
336	Microtrincas em pista de disco movido, Aço 52100	454
337	Aspecto de fadiga térmica e delaminação em curso, Aço 52100	454
338	Aspecto de desgaste severo, seção transversal da pista, Aço 52100	455
339	Umidade e temperatura (discos de Aço 52100, ER83)	456
340	Carga normal e velocidade (discos de Aço 52100, ER83)	457
341	Taxa de aquecimento e relação de deslizamento (Aço 52100, ER83)	458
342	Perda mássica (discos de Aço 52100, ER83)	459
343	Desgaste de pistas motora e movida, após 3,7 Megaciclos, Aço 52100	460
344	Desgaste de pistas motora e movida, após 12,7 Megaciclos, Aço 52100	460
345	Evidência de trinca subsuperficial paralela à pista, Aço 52100	461
346	Evidência de trincas inclinadas e paralelas à pista, Aço 52100	461
347	Aspecto de seção circunferencial, desgaste moderado, 12,7 Megaciclos	462
348	Idem, com trincas inclinadas em relação à pista	462
349	Umidade e temperatura (discos de Aço 52100, ER82)	463
350	Carga normal e velocidade (discos de Aço 52100, ER82)	464
351	Taxa de aquecimento e relação de deslizamento (Aço 52100, ER82)	465
352	Perda mássica (discos de Aço 52100, ER82)	466
353	Desgaste com transição frágil-dúctil na pista de Aço 52100	467
354	Malha de trincas térmicas na pista de Aço 52100, após 12,7 Megaciclos	467
355	Gênese de “debris” a partir de sulco de retificação, Aço 52100	468
356	Borda de pista sem dano aparente e com trinca transversal, Aço 52100	468
357	Aspecto de lascamento (“ <i>spalling</i> ”) em pista de Aço 52100	469
358	Evidência, em pista de Aço 52100, de zonas escuras	470
359	Idem, na interface pista-borda de pista de Aço 52100	470
360	Pites por indentação cíclica por partícula dura em pista de Aço 52100	471
361	Gênese de uma malha de trinca térmica e evidência de zona escura	471
362	Aspecto de deformação plástica em pista de aço 52100	472
363	Aspecto de gênese de dano em borboleta e microtrinca transversal	472
364	Partícula em processo de expulsão e de rolamento “ <i>fretting</i> ” na pista	473
365	Trincas subsuperficiais, seção circunferencial de pista de Aço	474
366	Dano em pista e matriz-carbonetos na subsuperfície circunferencial	474

Fig.	Assunto apresentado	Pág.
367	Trinca subsuperficial indicando zona de cisalhamento máximo	475
368	Presença de trincas próximas à pista de rolamento de aço 52100	475
369	Seção transversal da pista e trinca na interface pista-borda, Aço 52100	476
370	Seção transversal da pista e dano na interface pista-borda, Aço 52100	477
371	Trincas nucleadas e ramificadas na subsuperfície de pista de Aço 52100	478
372	Partículas ("debris") desprendidas de pistas de Aço AISI 52100	479
373	Idem	480
374	Umidade e temperatura (discos de Aço 52100, ER81)	481
375	Carga normal e velocidade (discos de Aço 52100, ER81)	482
376	Taxa de aquecimento e relação de deslizamento (Aço 52100, ER81)	483
377	Perda mássica (discos de Aço 52100, ER81)	484
378	Evidência sutil de corrugação e poligonização em pista de Aço 52100	485
379	Desgaste de pistas motora e movida de Aço 52100, após 11,9 Megaciclos	485
380	Desgaste moderado em pista de rolamento, Aço 52100	486
381	Evidências de danos superficiais em pista de Aço 52100	486
382	Evidência de formação de proa em expulsão de partícula de pista de Aço	487
383	Aspecto de desgaste moderado em pista de Aço 52100	487
384	Osculação dos contatos conforme, não-conforme e seu limiar	488
385	Zona de contato de Hertz, sem atrito e sob carga estática	489

Anexo A

Procedimentos de Manufatura e Extração de Corpos-de-Prova (C.P.) para análise

“- Non, non ! Pas de détails! Surtout pas de détails. Une victoire racontée en détails, on ne sait plus ce qui la distingue d'une défaite. C'est bien une victoire, au moins ?

SARTRE, Jean Paul [1902-1980] *Le Diable et le bon Dieu*. Paris, Librairie Gallimard, 1951. p. 13.

A.1. Retificação das superfícies esféricas

O processo de retificação de uma superfície esférica, seja CNC ou de perfil, requer um cuidado contínuo com a dressagem do rebolo abrasivo para se assegurar à peça-obra uma superfície com mínimos desvios de esfericidade. Contribui, para isto, a manutenção de um conjunto uniforme de temperatura e pressão de corte.

A Figura 119 apresenta a bancada de retificação de perfil durante o processo de usinagem de acabamento da superfície esférica de contato de um disco (1). Destacam-se o rebolo abrasivo (2), cujo perfil esférico é assegurado pelo dispositivo dressador (3), em que raio de ação do diamante de corte é ajustável aos valores especificados em projeto, de modo a garantir o perfil esférico desejado ao rebolo e, pois, à peça.

Durante a retificação dos discos ao longo deste trabalho, manteve-se o fluido de corte desligado e a temperatura e pressão de corte o mais uniformes possíveis, de modo a se minimizarem ondulações diferenciadas na pista de rolamento do disco. O revenimento introduzido pela utilização desta prática foi comum a todos os discos. Diferentes pressões, vazões e concentrações do fluido de corte na zona de usinagem poderiam introduzir uma variável adicional ao processo.

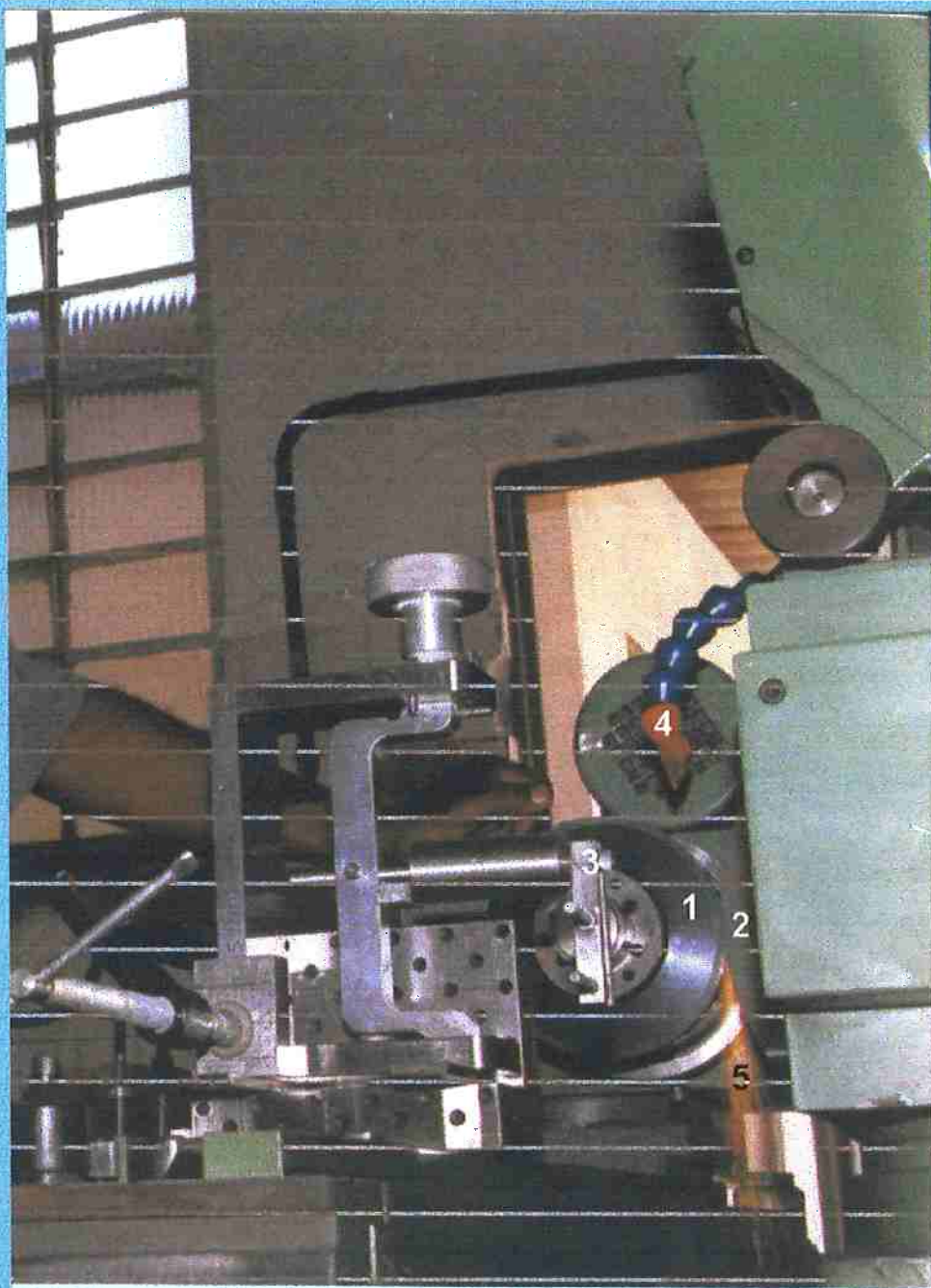


Figura 119. Bancada para a retificação cilíndrica das superfícies esféricas dos discos de ensaio: 1. Disco de aço AISI 52100 em processo; 2. Rebolo abrasivo durante usinagem da pista de perfil esférico no disco; 3. Dispositivo de suporte para a dressagem do rebolo abrasivo, segundo o perfil esférico desejado; 4. Fluido de corte desligado durante a usinagem; 5. Pajulhas oriundas da retificação, um dos sensores empíricos da qualidade da usinagem em processo.

O primeiro dispositivo a ser empregado foi o de centralização dos discos na placa universal. A Figura 120 apresenta o procedimento utilizado durante cada medida e ajuste da sede dos discos.

Não se toleravam desvios de batimento radial da sede de fixação do disco, ou seja, pode-se considerá-lo como tendo valor máximo de 1,0 μm , resolução do instrumento de medida utilizado, de marca Mitutoyo.

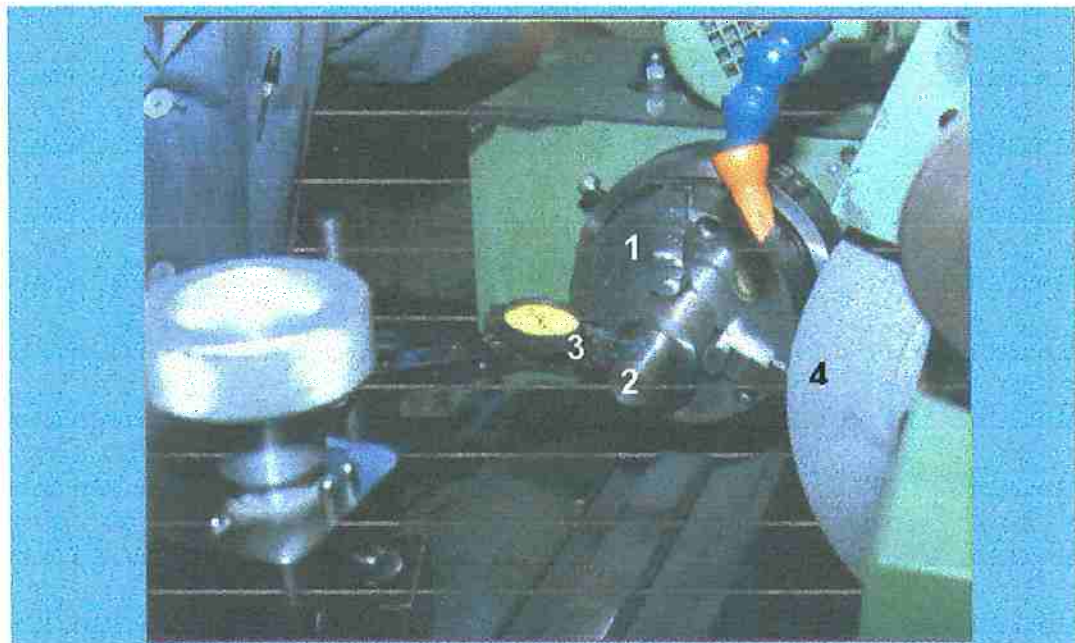


Figura 120. Processo de medida do batimento radial da sede de fixação dos discos de ensaio: 1. Placa universal de três castanhas; 2. Eixo porta-disco com geratrizes cilíndrica (para assegurar a sua fixação à placa) e cônica (para sediar o disco de ensaio), com extremidade rosca para receber parafuso de fixação do disco no eixo; 3. Relógio apalpador para medida e ajuste do batimento radial; 4. Reboio abrasivo.

O dispositivo de fixação dos discos, uma viga em balanço com alta rigidez flexional, K_f , era preso à placa universal através de três pontos de apoio. Esse tipo de engaste, se, por um lado, abaixa a rigidez flexional, permite minimizar-se com facilidade o desvio de batimento radial, por outro ($K_f = \text{carga}/\text{deflexão máxima} = F/\delta = [E.(I/c)/l^2 = 528 \text{ N}/\mu\text{m}$

$$\{[210 \text{ GPa}].[\pi.d^3/32]/l^2\} = \{210.10^9[\pi.(40.10^{-3})^3/32]/(50.10^{-3})^2\} = 528.10^6 \text{ N/m} = 528 \text{ N}/\mu\text{m}.$$

Etapas finais do processo são mostras pelas figuras 121, 122, 123 e 124.

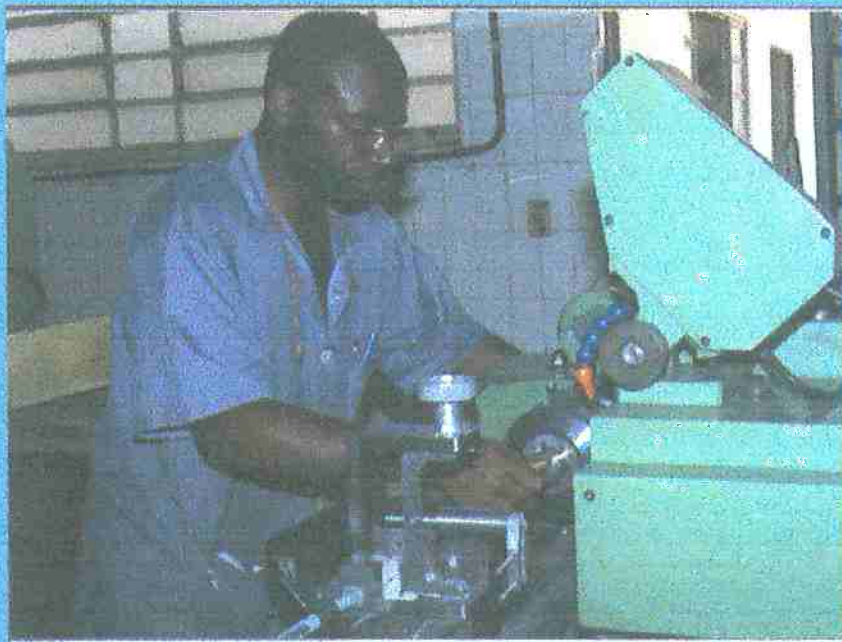


Figura 121. Fixação dos discos de ensaio na sede

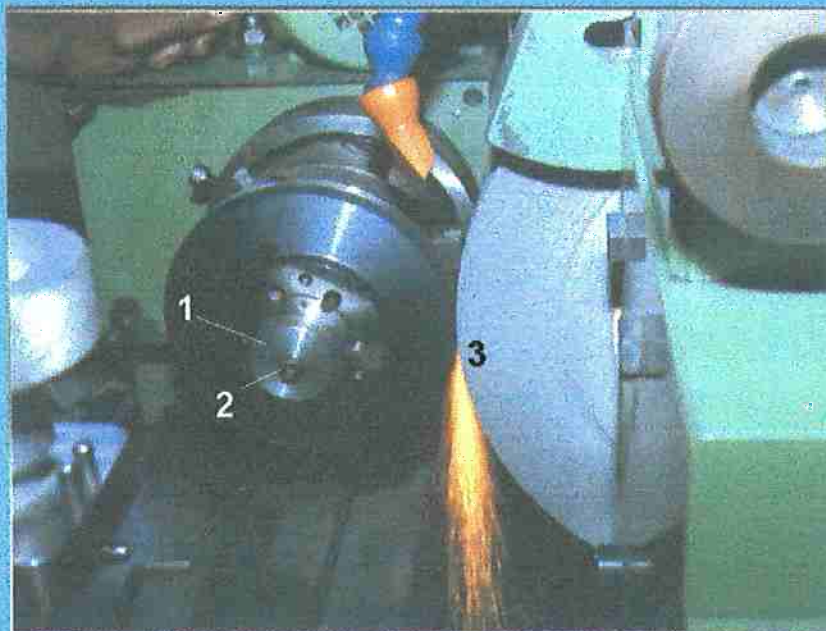


Figura 122. Processo de retificação dos discos de ensaio (50 rpm) em processo, detalhando-se a fixação dos discos, numa configuração de máxima rigidez:

1. Sistema de arruelas utilizado; 2. Parafuso *Allen* de fixação; 3. Rebolo abrasivo (óxido de alumínio, # 60, diâmetro 300 mm, 2400 rpm) com o perfil especificado, durante a execução da usinagem a seco.



Figura 123. Inspeção e medição final dos discos e desmagnetização após usinagem final por retificação.



Figura 124. Acondicionamento de discos novos oriundos da manufatura (acima) e após ensaiados (abaixo)

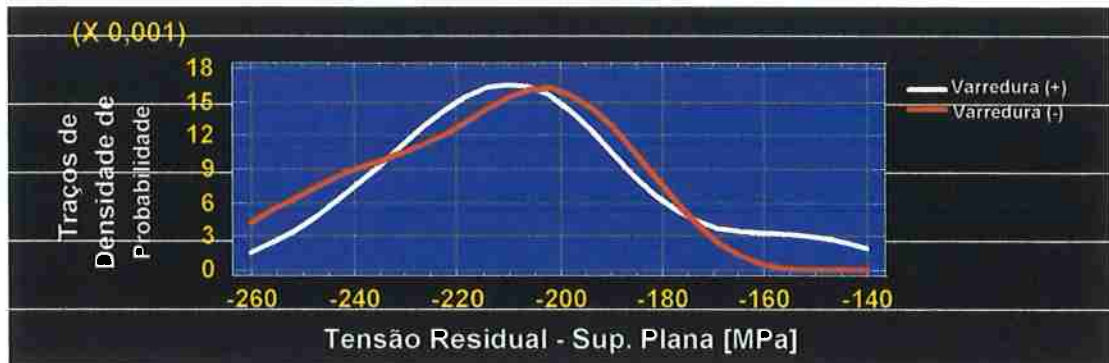


Figura 125. Distribuição da Tensão Residual na camada superficial de discos de aço AISI 52100 após tratamento térmico por têmpera e revenimento e subsequente **retificação plana** nas amostras submetidas aos ensaios de ciclagem térmica (Kolmogorov-Smirnov: $p = 0,9794 \Rightarrow$ não há diferença estatística significativa entre as duas varreduras)

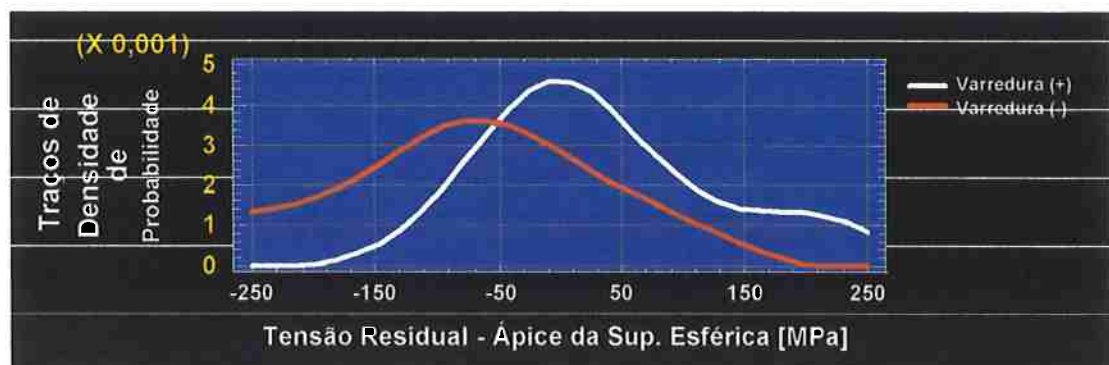


Figura 126. Tensão Residual na camada superficial de discos de aço AISI 52100 após tratamento térmico por têmpera e revenimento e subsequente **retificação do perfil esférico** (Kolmogorov-Smirnov: $p = 0,3313 \Rightarrow$ não há diferença estatística significativa entre as duas varreduras)

A pressão de corte na retificação das pistas esféricas é determinada como uma função das velocidades do rebolo (34,3 m/s) e do disco (0,39 m/s), da largura do contato (8,08 mm) e da profundidade de corte por passe (máximo 3 μm).

As distribuições da tensão residual das superfícies retificadas planas e esféricas, figuras 125 e 126, foram obtidas por difração de raios-X utilizando-se um difratômetro Rigaku D-max 2000 (IPEN-USP) e seu módulo adicional “stress attachment”, detetor de cintilação de NaI (Tl), radiação Cr-K α e a técnica de $\text{sen}^2\psi$.

Importa destacar o estado de *tensões compressivas* nas superfícies *planas* retificadas, enquanto algumas superfícies esféricas demonstraram conter, em sua rede cristalina, a coexistência de tensões residuais de tração e compressão.

A.2. Extração, por eletroerosão, de amostras dos discos ensaiados para manufatura de C.P. com entalhe Chevron

A norma ASTM-E1304 / 97 especifica procedimentos e sugere dimensões para corpos-de-prova com entalhe “Chevron” para a avaliação de tenacidade à fratura do material. A Tabela 35 e a Figura 127 apresentam as características geométricas dos corpos-de-prova padronizados.

Tabela 35. Dimensões dos corpos-de-prova para usinagem de entalhe chevron segundo a norma ASTM 1304 / 97

Símbolo	Designação	w/b		Tolerância ±
		1,45	2,00	
B	espessura	1,45*b	2,00*B	0,010*B
W	comprimento	0,481*B	0,400*B	0,005*B
W+X	comprimento total [mm]	0,150*B	0,150*B	0,010*B
ao	dist.à ponta do chevron	0,130*B	0,130*B	0,010*B
S	profund.ranhura p/garra	0,100*B	0,100*B	0,003*B
X	distância à linha de carga	0,05*B	0,05*B	0,003*B
T	largura da ranhura p/garra	0,350*B	0,350*B	0,005*B
t	espessura nominal do entalhe	0,313*B	0,1*B	0,005*B (*)
ϕ	ângulo da seção resistente crevron	54,6°	34,7°	0,5grau
2H	altura da amostra quadrada	0,500*B	0,500*B	0,005*B
2H	altura da amostra retangular	0,435*B	(**)	0,005*B

(*) Devido a limitações do disco abrasivo, $t = 0,55 \pm 0,05$ mm

(**) Dado não disponível e deve ser analisado para esta configuração geométrica

Uma limitação devido à fabricação dos corpos-de-prova por processo de abrasão (retificação) impediu que se assegurasse a espessura do entalhe ao nível de 10% da sua espessura, ou seja, 0,10.B. A menor espessura de disco abrasivo, sob encomenda no mercado especializado, possuía $t = 0,55 \pm 0,05$ mm, definindo entalhes com espessura $t = 0,60 \pm 0,05$ mm, fora de norma, em medida imposta por essas limitações.

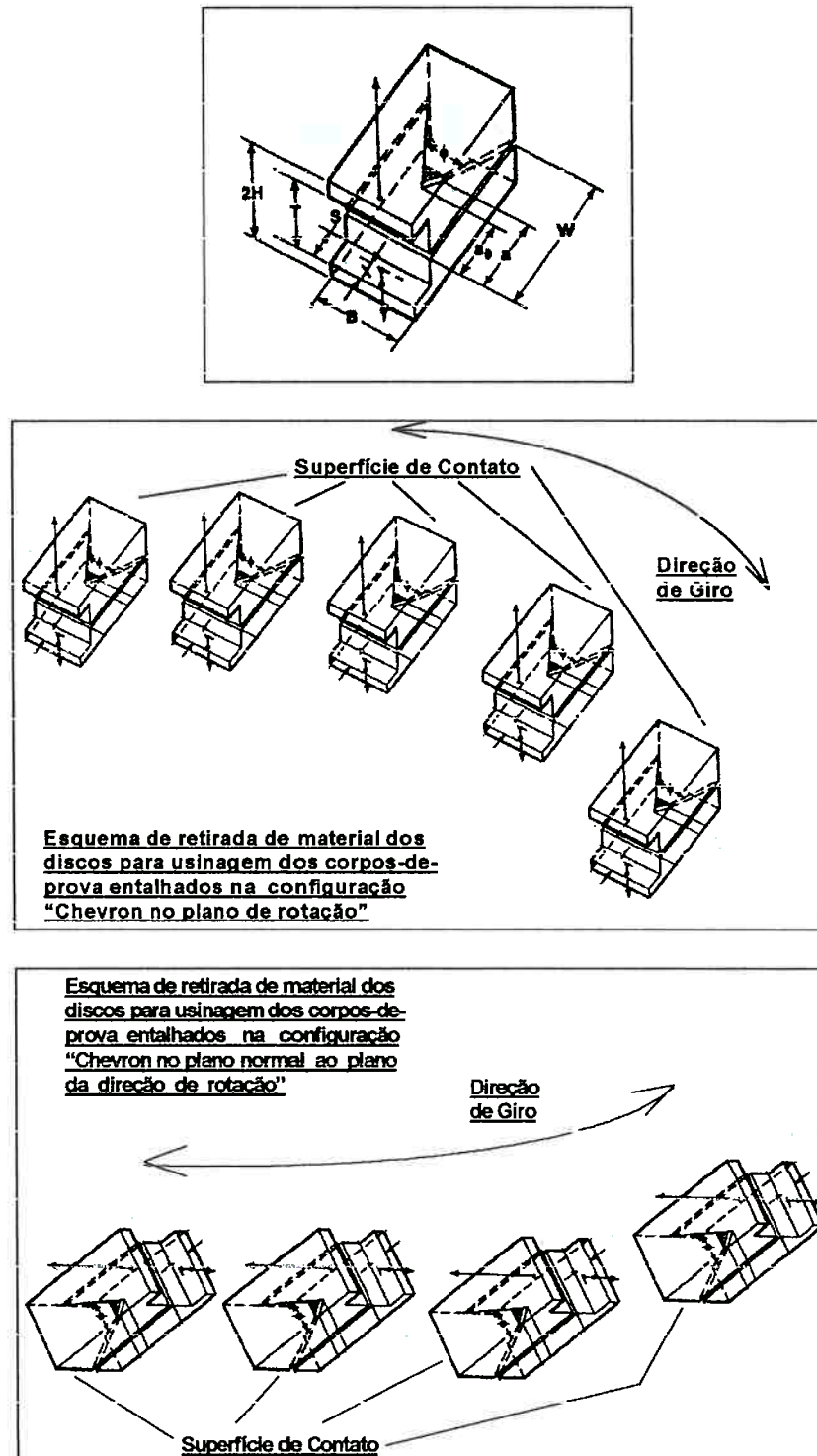


Figura 127. Esboço do corpo-de-prova com entalhe “Chevron” para medida de tenacidade à fratura, conforme a norma ASTM E-1304 / 97 e sua posição relativa nos discos de ensaio



Figura 128. Aspectos da usinagem eletroerosiva na retirada dos blanques para retificação dos corpos-de-prova com entalhe "Chevron"

A usinagem do entalhe “Chevron” por processos não-convencionais (EDM, ultrassom, jato d’água) não reproduziria a retificação. A Figura 128 mostra a extração em processo de amostras do material do disco.

A.3. Retificação final dos C.P. com entalhe Chevron

A necessidade de se assegurar idênticas condições no processo de retificação e repetibilidade dimensional na abertura do entalhe “Chevron”, estimulou a construção de dois dispositivos especiais: um, porta-amostra, e outro, porta-eletrodo, de modo a aumentar a rigidez do conjunto ferramenta de corte (Figuras 129 e 130).

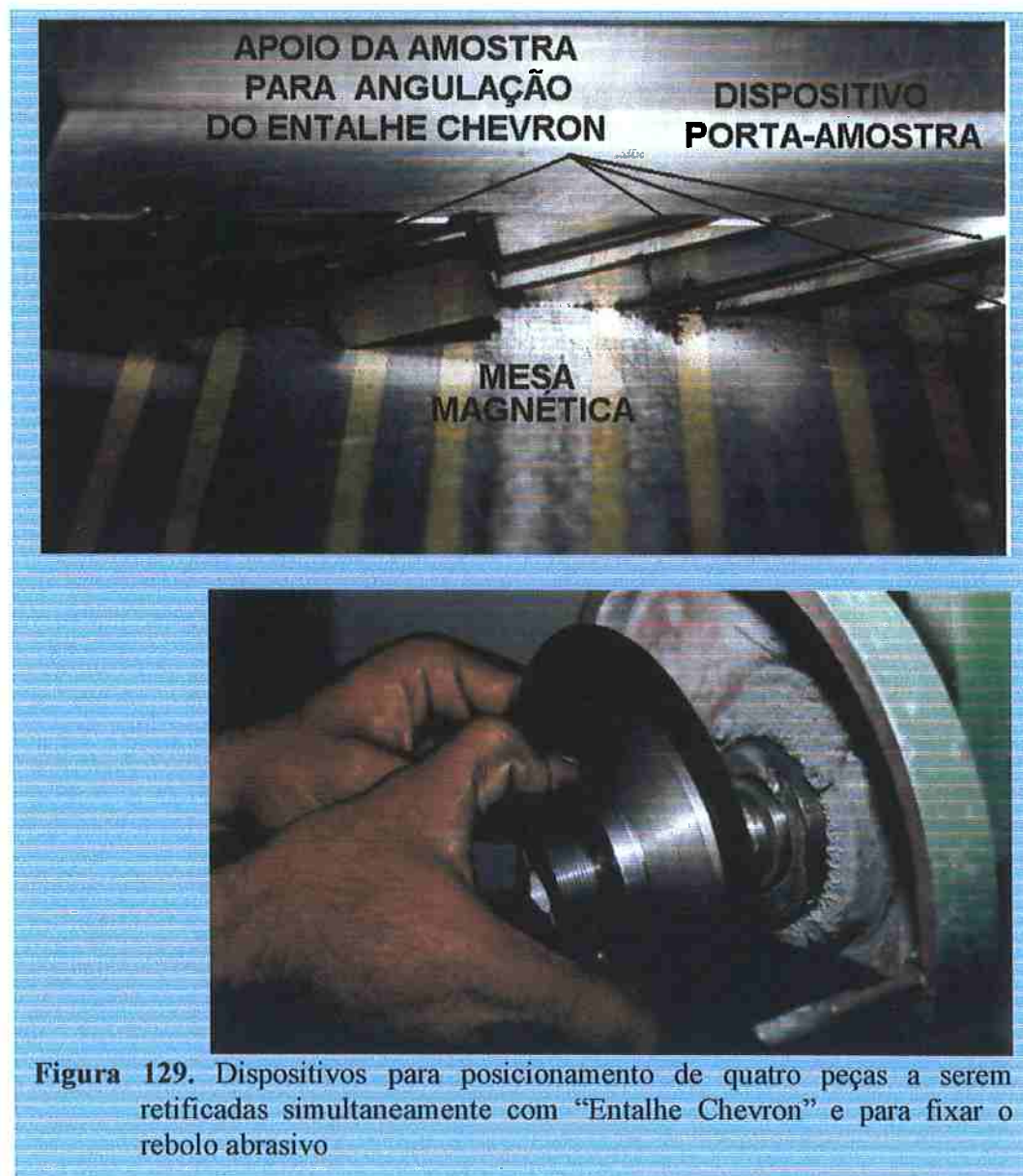


Figura 129. Dispositivos para posicionamento de quatro peças a serem retificadas simultaneamente com “Entalhe Chevron” e para fixar o rebole abrasivo

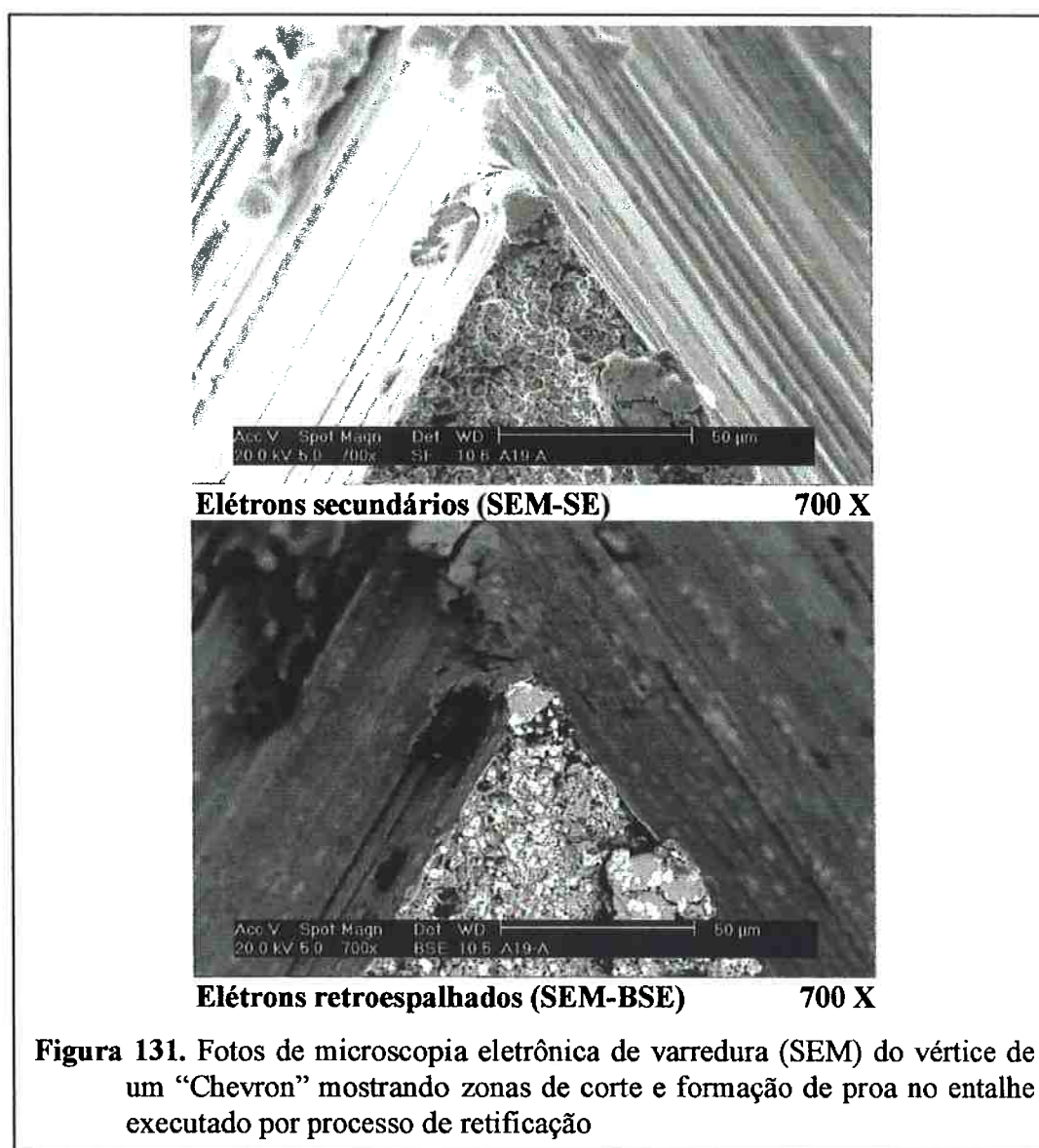


Conjuntos de corpos-de-prova, ao serem retificados simultaneamente, asseguram uma homogeneidade produtiva, de modo que possíveis diferenças na resposta ao ensaio de tenacidade à fratura dever-se-ão prioritariamente ao comportamento do material e seu tratamento, isentando-se diferenças relativas ao processo de fabricação do entalhe.

A idéia inicial era a de retificar um lote de sete peças por passe, facilitando o tratamento estatístico dos dados e sua análise na etapa subsequente aos ensaios de

tenacidade. Entretanto, em função da pequena espessura e do desgaste do rebolo abrasivo, adotaram-se quatro peças por lote. Influíram na decisão a combinação de pressão de corte, profundidade final do corte, velocidade relativa rebolo-mesa, dureza do material usinado (na faixa de 64 a 67 HRC), comprimento de usinagem por passe e elevação da temperatura de sua borda de contato com as peças em processo na zona de usinagem.

A plasticidade constatada na ponta do “Chevron” e sua morfologia são testemunhas da temperatura da peça-obra durante a fase final do proceso de retificação, evidenciadas na Figura 131.



Anexo B

Aferição e calibração do sistema de medida da temperatura de contato por pirômetro óptico

“When you can measure something about what you are saying, and express it in numbers, you know something about it, but when you cannot express it in numbers, your knowledge is of a meager and unsatisfactory kind; it maybe the beginning of knowledge but you have scarcely in your thoughts, advanced to the stage of science.”

Lord Kelvin [1824-1907] In: (sem autor) [1981] *Popular lectures and addresses*, McMillan, New York, p. 13.

B.1. Pirômetro óptico da máquina de ensaio disco-disco

Um pirômetro óptico *Calex*, de procedência européia, com fundo de escala de 873 K (600 °C), equipa a máquina disco-disco. Tem construção robusta e suporta os efeitos termomecânicos das solicitações dinâmicas do contato. É fixado por um sistema roscado a um tubo, cuja distância à zona de contato entre os discos é constante. Dispõe de um sistema de ajuste da emissividade dos discos em contato.

À distância em que está instalado, em relação à zona de contato entre os discos, o diâmetro do alvo da medida desse instrumento é de cerca de 22 ± 2 mm. Isto significa dizer que, apesar do contato de rolamento acontecer em uma zona cuja área projetada possui ordem de grandeza entre 1 e 15 mm^2 , a tomada de leitura de temperatura é feita em um círculo cuja área está compreendida entre 300 e 450 mm^2 , ou seja, tem-se uma relação de áreas (área da fonte quente/ área do alvo) situada entre 1:20 e 1:450. Equivale a medir-se a área de toda uma curva gaussiana, desejando-se representar, na realidade, uma área compreendida entre $\pm 0,11$ e $\pm 2,50\%$ em torno do seu pico médio.

B.2. Sistema de aferição da medida do pirômetro em um campo de temperatura

Baseado na lei de variação do campo de temperatura em torno de uma fonte quente em regime permanente, desenvolveu-se um sistema experimental que possibilitasse medir e esboçar essa distribuição da temperatura, buscando-se correlação com a leitura fornecida pelo pirômetro.

O sistema é apresentado na Figura 132 e utilizou um ferro de soldar de 30 Watts como fonte quente e um *dispositivo para aferição* com uma matriz quadrada de 7x7 furos, de diâmetro 1,5 mm, área 1,77 mm², onde os termopares eram inseridos para medição da temperatura em cada um dos furos.

Cada fileira de furos distava 5 mm, 10 mm e 15 mm da fonte quente, acima e abaixo, à direita e à esquerda, respectivamente. Instalou-se a fonte quente no furo central, cuja área se relacionava com as áreas das medidas da temperatura nas fileiras nas proporções de 1:11, 1:44 e 1:100, aproximadamente. Na Figura 133, tem-se a distribuição (quartis) das temperaturas medidas pelos termopares em cada série de furos e pelo pirômetro, na área compreendida pelos 7x7 furos.

Ao se incluírem furos igualmente espaçados na placa metálica, tinham-se dois objetivos: a) gerar uma impedância térmica não linear, com descontinuidades no fluxo de calor por condução, introduzindo-se fenômenos locais de termotransferência por convecção e radiação; b) correlacionar as variações entre as medidas das três colunas à esquerda e das três à direita com as medidas de temperatura obtidas nos furos da coluna central, simulando-se, desta forma, um pico de temperatura na zona de contato entre as asperezas no sistema disco-disco e o forte decaimento da temperatura na circunvizinhança.

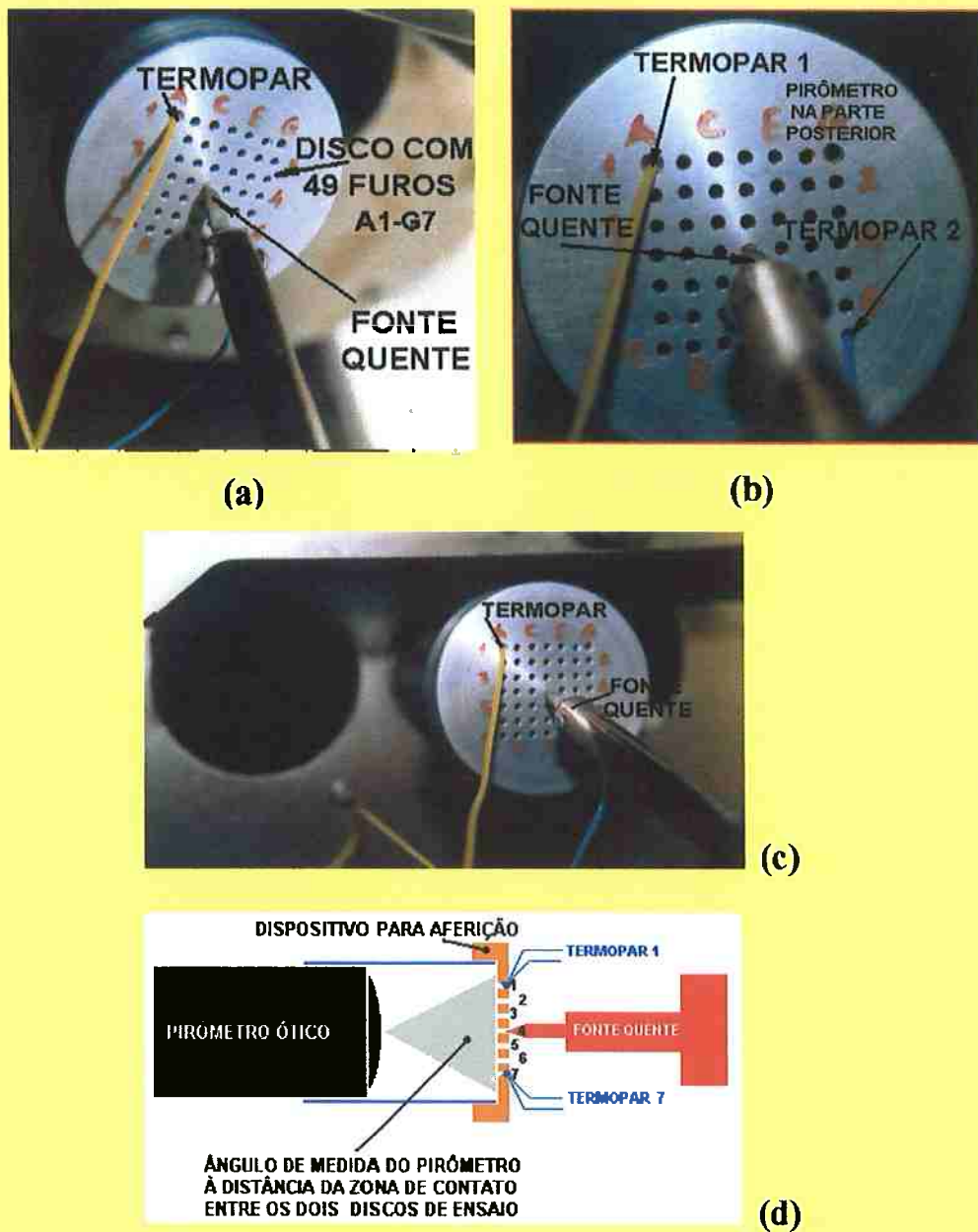


Figura 132. Sistema desenvolvido para aferição da temperatura medida pelo pirômetro ótico em relação a um campo de temperatura em torno de uma fonte quente, utilizando-se um dispositivo com 49 furos, termopares e uma fonte quente estacionária (figuras a, b, c) e desenho esquemático do conjunto (d)

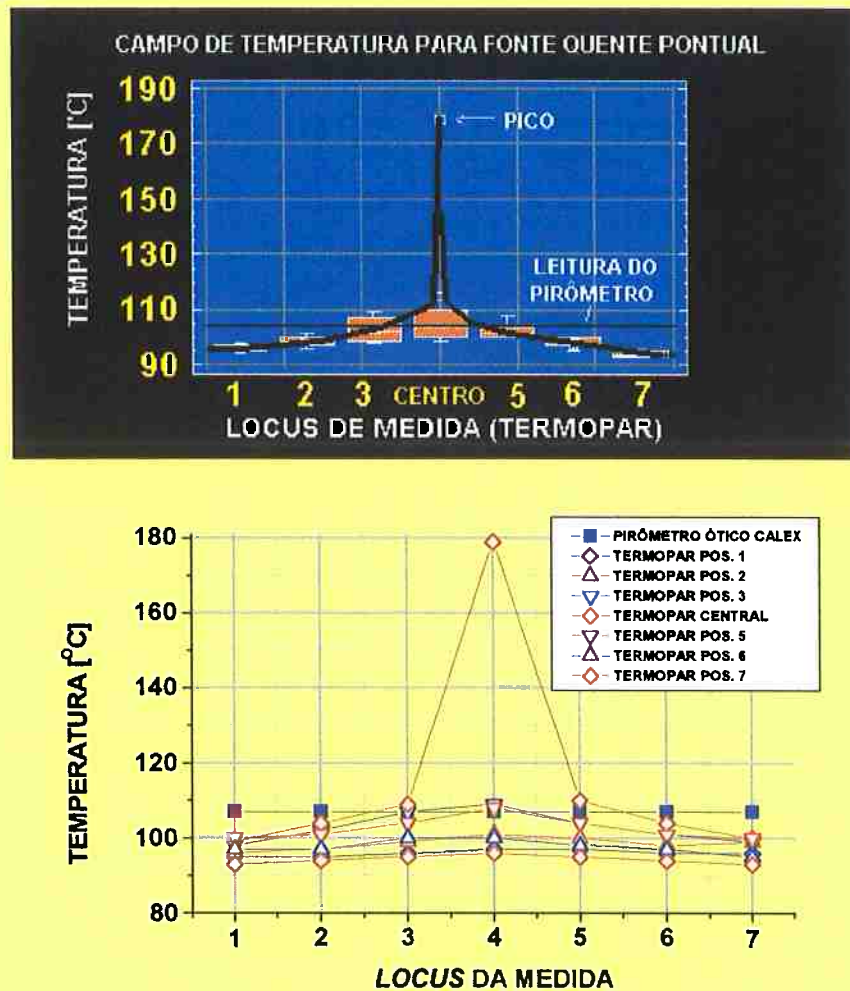


Figura 133. Distribuição em quartis (acima) e leituras do pirômetro ótico e termopares, de acordo com a posição dos furos no dispositivo de aferição

Utilizando-se a técnica de análise de modelos de calibração do *software* Statgraphics® Plus 2.1 for Windows, para ajuste dos dados, associado à análise de variância ANOVA, obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 36, em que se explicita também a consistência estatística dos resultados.

Tabela 36. Ajuste dos dados de temperatura medidos nas colunas 1, 2, 3, 5, 6 e 7 e aqueles medidos na coluna central

Distância à coluna central [mm]	Coluna Número $i =$	$A1_i$	$B1_i$	Correlação de Pearson		Análise de Variância ANOVA	
				R^2	Correlação	F	p
15	1	8313,45	2 924 480	37,81	0,614922	3,04	0,1417
10	2	4649,38	1 583 380	47,80	0,691375	4,58	0,0853
5	3	2392,00	753 141	57,21	0,756397	6,69	0,0491
5	5	3637,12	1 220 210	78,32	0,884974	18,06	0,0081
10	6	4179,00	1 405 350	41,60	0,645013	3,56	0,1178
15	7	7695,85	2 684 050	60,20	0,775887	7,56	0,0403

Ao nível de 95% de confiabilidade, há diferença significativa entre as colunas ($p < 0,05$)

$$\text{Modelo ajustado: } T_{\text{Coluna Central}} = A1_i - \frac{B1_i}{T_{i-\text{Coluna}}} [K] \quad \text{onde:}$$

$T_{\text{Coluna Central}}$ = temperatura na coluna central [K]

$T_{i-\text{Coluna}}$ = temperatura na i -ésima-coluna [K]

$A1_i, B1_i$ = constantes de ajuste entre a temperatura da Coluna Central e a i -ésima-Coluna

Os esboços das curvas relativas aos modelos ajustados constantes da Tabela 36 estão traçados na Figura 134. Considerados as curvas e os resultados da comparação entre as duas amostras de dados de temperatura, infere-se que são estatisticamente significativos, ao nível de 95% de confiabilidade, os desvios D_5 que integram a zona colorida da Figura 134.

Portanto, na borda da área definida pelas colunas à esquerda e direita distantes 5 mm da coluna central, uma temperatura de 600 °C, nesse modelo, associa-se a uma zona central de pico cuja temperatura tem 95% de chance de estar compreendida entre 1500 e 2223 K (1227 e 1900 °C).

Na Figura 133 tem-se uma idéia da dimensão real da inserção da temperatura medida pelo pirômetro em relação àquelas dos *locii* 3 e 5, da medida de pico registrada na coluna 4 central e da interrelação física entre essas medidas.

Ao nível de 95% de confiabilidade, pode-se esperar que a temperatura lida pelo pirômetro óptico esteja associada a uma temperatura de pico, de acordo com o modelo apresentado.

Com base nesse raciocínio e nessa fundamentação, construíram-se as curvas da Figura 135. Correlacionam-se as temperaturas lidas no pirômetro, até 873 K (600 °C), e os prováveis picos de temperatura integrantes do campo térmico avaliado, desde um campo isotérmico, até o limite em que a relação entre as áreas da temperatura de pico e do alvo lido pelo pirômetro seja da ordem de 1:44.

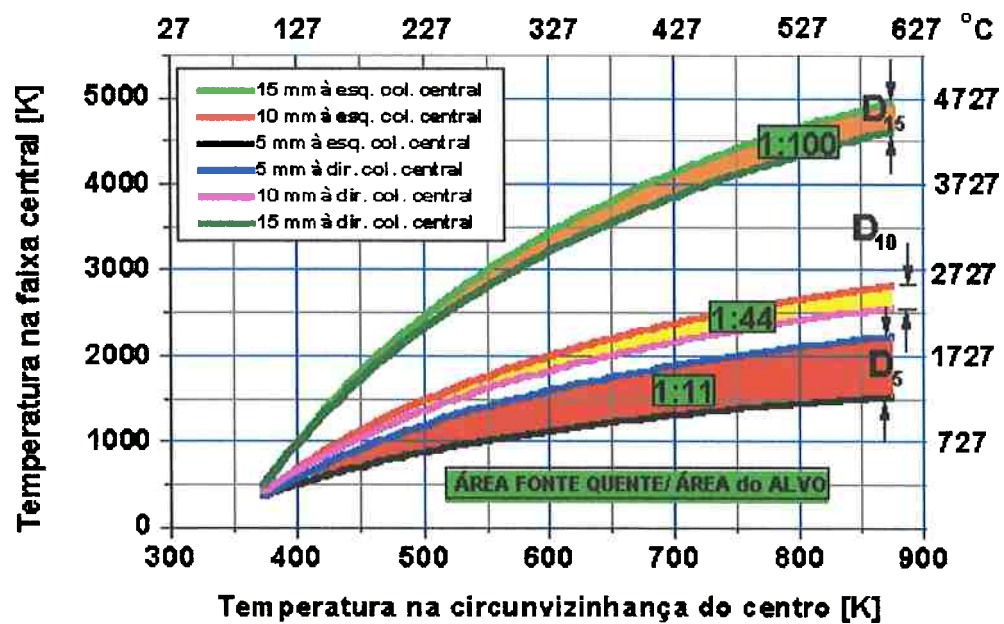


Figura 134. Modelos de ajuste correlacionando as medidas de temperatura obtidas pelos termopares de acordo com a posição dos furos (relação de área ou campos térmicos) no *dispositivo de aferição* , destacando-se os desvios de simetria **D** em relação às medidas equidistantes 5, 10 e 15 mm à direita e esquerda da coluna central

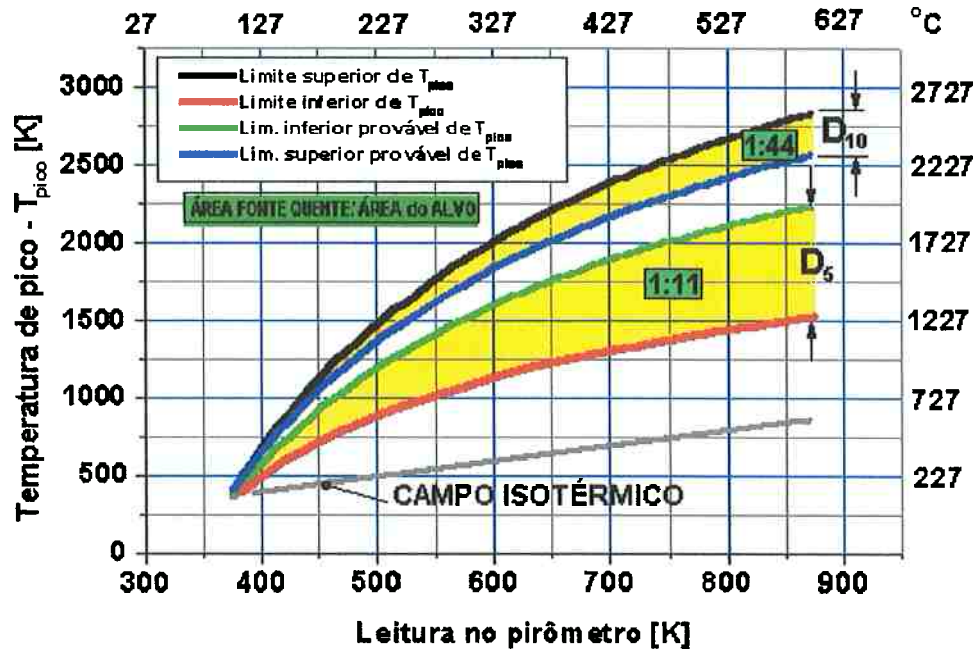


Figura 135. Faixas de correlação provável entre a medida fornecida pelo pirômetro ótico *Calex* e a temperatura de pico no campo térmico avaliado

No pirômetro *Calex* utilizado, à distância de medida, trata-se de uma área circular de temperatura de pico com cerca de $1,65 \pm 0,15$ mm de raio (curva 1:44).

B.3. Evidências dos efeitos térmicos de alta temperatura

A necessidade que deflagrou o desenvolvimento deste sistema de aferição e calibração foi a constatação de um conjunto de evidências experimentais em que não se compatibilizavam os valores de temperatura de contato fornecido pelo pirômetro ótico, a formação de filmes de óxidos e alguns mecanismos de dano visualizados nas pistas de rolamento através de microscopia eletrônica de varredura.

A partir da aferição e calibração do pirômetro ótico através do sistema desenvolvido, puderam-se associar valores avaliados para a temperatura a partir dos resultados encontrados.

Como um exemplo, apresenta-se a morfologia de uma pista de um disco motor de aço AISI 52100 OQT (disco antagonista de aço AISI 52100 SBQT), em foto de microscopia eletrônica de varredura (SE-SEM) obtida após a conclusão de um ensaio disco-disco entre duas pistas de aço AISI 52100 ($6000\text{N} \leq \text{Carga Normal} \leq 6900\text{ N}$, temperatura de contato $T_{\text{máx}} = 873\text{ K}$ (600°C), $2,22\text{ GPa} \leq (p_0)_{\text{máx}} [\text{Hertz}] \leq 2,33\text{ GPa}$, $0,74\text{ GPa} \leq \tau_{\text{máx}} \leq 0,78\text{ GPa}$, vida = 11,60 Megaciclos, diâmetro teórico do contato $2,3\text{ mm} \leq 2a \leq 2,4\text{ mm}$).

Tem-se, desta forma, uma área *teórica* de contato compreendida entre $4\text{ mm}^2 \leq A_{\text{cont}} \leq 5\text{ mm}^2$. Entretanto, a trilha de óxido impressa na pista ([ing.] “*footprint*”), neste caso apresentou-se com o dobro do valor teórico, o que leva essa área a um valor de cerca de 25 mm^2 . A área de temperatura avaliada pelo pirômetro à distância-padrão, como visto anteriormente é de, no mínimo, 300 mm^2 , ou seja, uma relação de 1:12.

Conforme a Figura 134, uma temperatura de 873 K lida no pirômetro está associada, na faixa de relações de área de 1:11, a uma faixa *possível* de temperatura de pico compreendida entre 1500 e 2250 K (1227 a 1977°C). Como o contato acontece a uma velocidade elevada, o tempo em que uma microzona pontual permanece a essa temperatura, a uma velocidade de 5.000 rpm, é da ordem de um milisegundo, tempo insuficiente para fundir localmente o material, mas conjugação de um pico de solicitação termomecânica considerável.

A Figura 136 evidencia a morfologia de uma das pistas de contato, ao fim de sua vida útil, acalorando esta discussão. Percebe-se, na foto menor, detalhe da ocorrência de um dano por micro-abrasão, com subsequente arrancamento de material da pista de rolamento. Na foto maior, em outro local, indícios de superaquecimento e depressões nessa mesma pista, possivelmente causados pelo movimento de terceiro corpo.



20 μ m

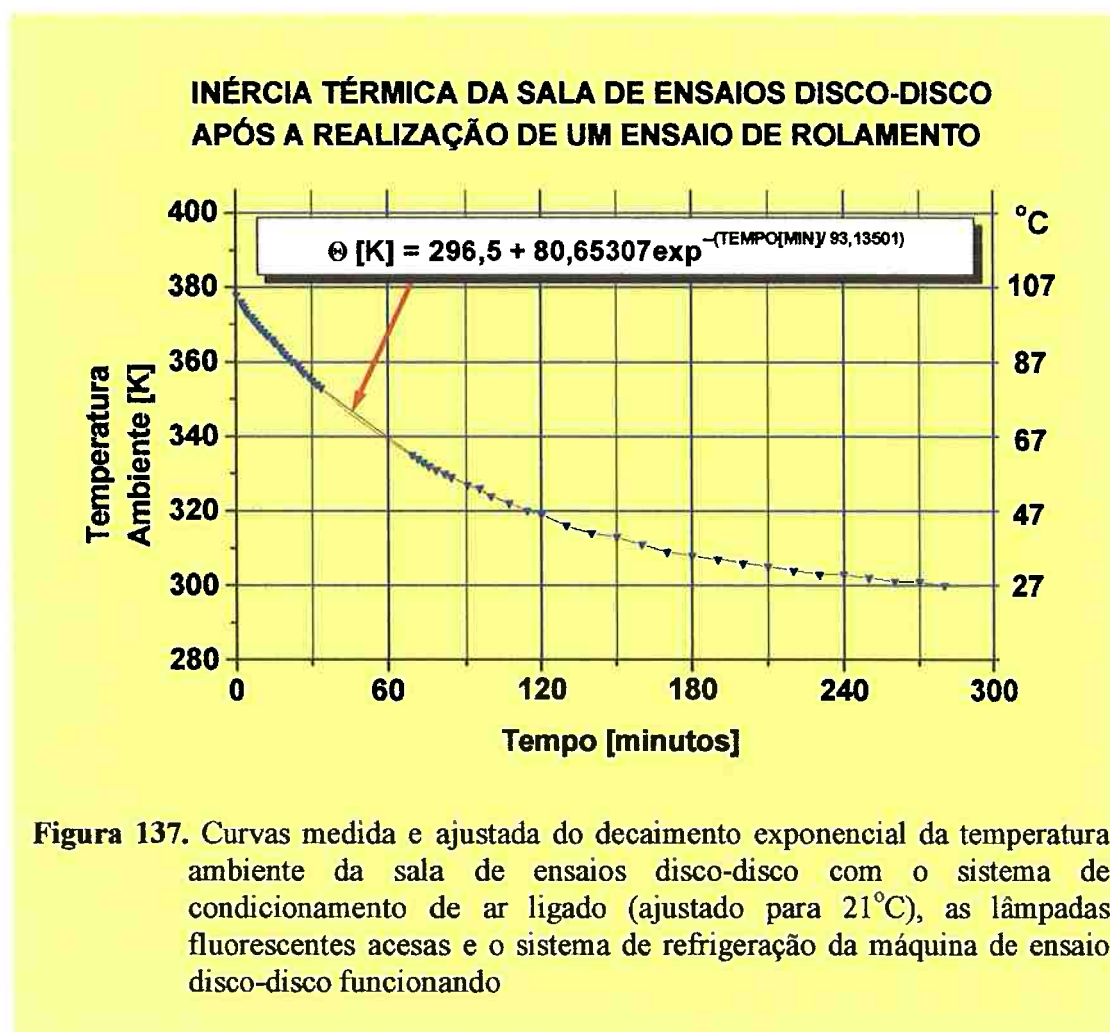
Figura 136. Morfologia de dano em pista de disco motor de aço AISI 52100 SBQT (disco antagonista de aço AISI 52100 SBQT)



20 μ m

A caracterização da inércia térmica da sala de ensaios disco-disco é mostrada na Figura 137. Essa curva foi obtida com a medida da temperatura do pirômetro óptico, posicionado em seu local de trabalho, e medindo o resfriamento de um par de discos até a temperatura ambiente, mantida a 21 C pelo sistema de refrigeração da sala, num tempo total de cinco horas, mantidas as portas fechadas.

Desta forma, quando a temperatura da sala elevava-se, por exemplo, de 21 para 28 C, com o sistema de refrigeração ligado, a energia calorífica era proveniente da transferência de calor desde o contato, caracterizando a *anergia térmica do contato* de rolamento cíclico reportada neste trabalho .



Anexo C

Aferição do Decibelímetro (SPM)

“Já deves ter ouvido falar daquele Astrônomo florentino que, para explicar o Universo, usou o telescópio, hypérbole dos olhos, e com o telescópio viu aquilo que os olhos somente imaginavam. Tenho em alta conta os Instrumentos Mechanicos usados para entender, como se costuma dizer hoje, a Cousa Extensa. ”

ECO, Umberro (na voz de seu personagem medieval Padre Emanuele) *A Ilha do Dia Anterior*. Rio de Janeiro, Record, 1995. p. 91.

C.1. Apresentação do sistema

A resposta de um decibelímetro (“*Sound Pressure Meter*”, SPM [ing.]) às excitações provocadas pelo contato de um par de discos metálicos não conformes, não lubrificadas, requer uma aferição sistemática. Para isto, desenvolveu-se um procedimento de aferição utilizando-se o sistema de medidas apresentado nas Figuras 138 e 139, baseado em DOEBELIN [1976] e HADDAD & PARSON [1991].

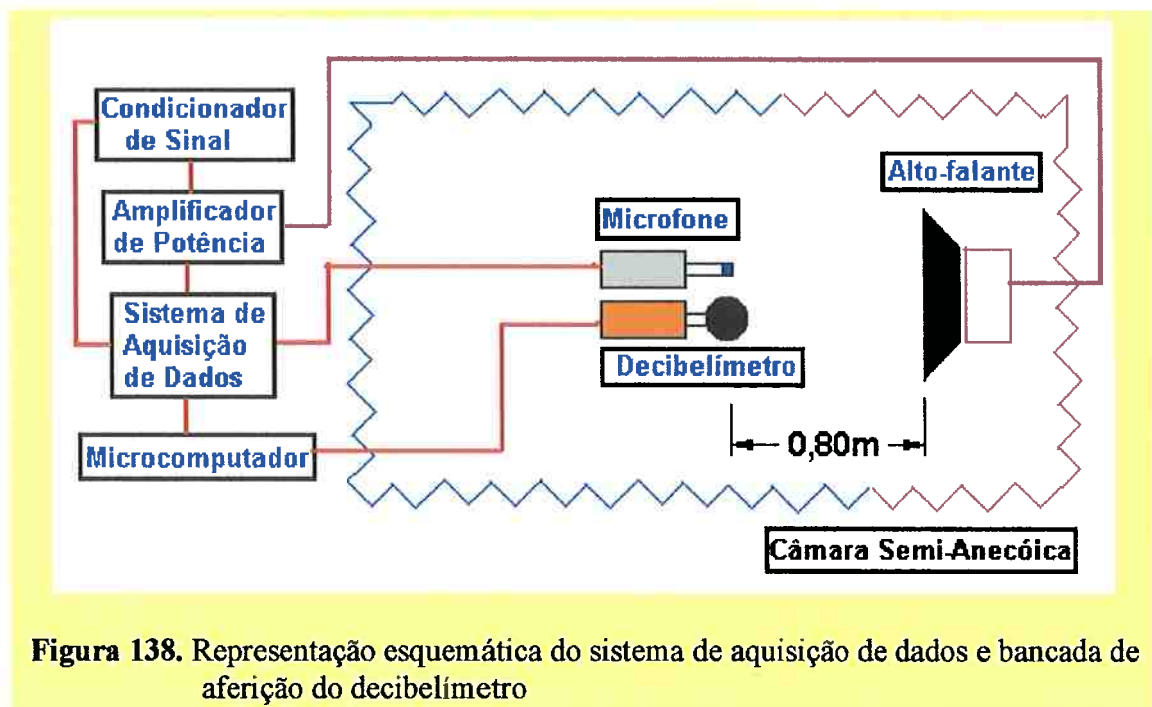


Figura 138. Representação esquemática do sistema de aquisição de dados e bancada de aferição do decibelímetro

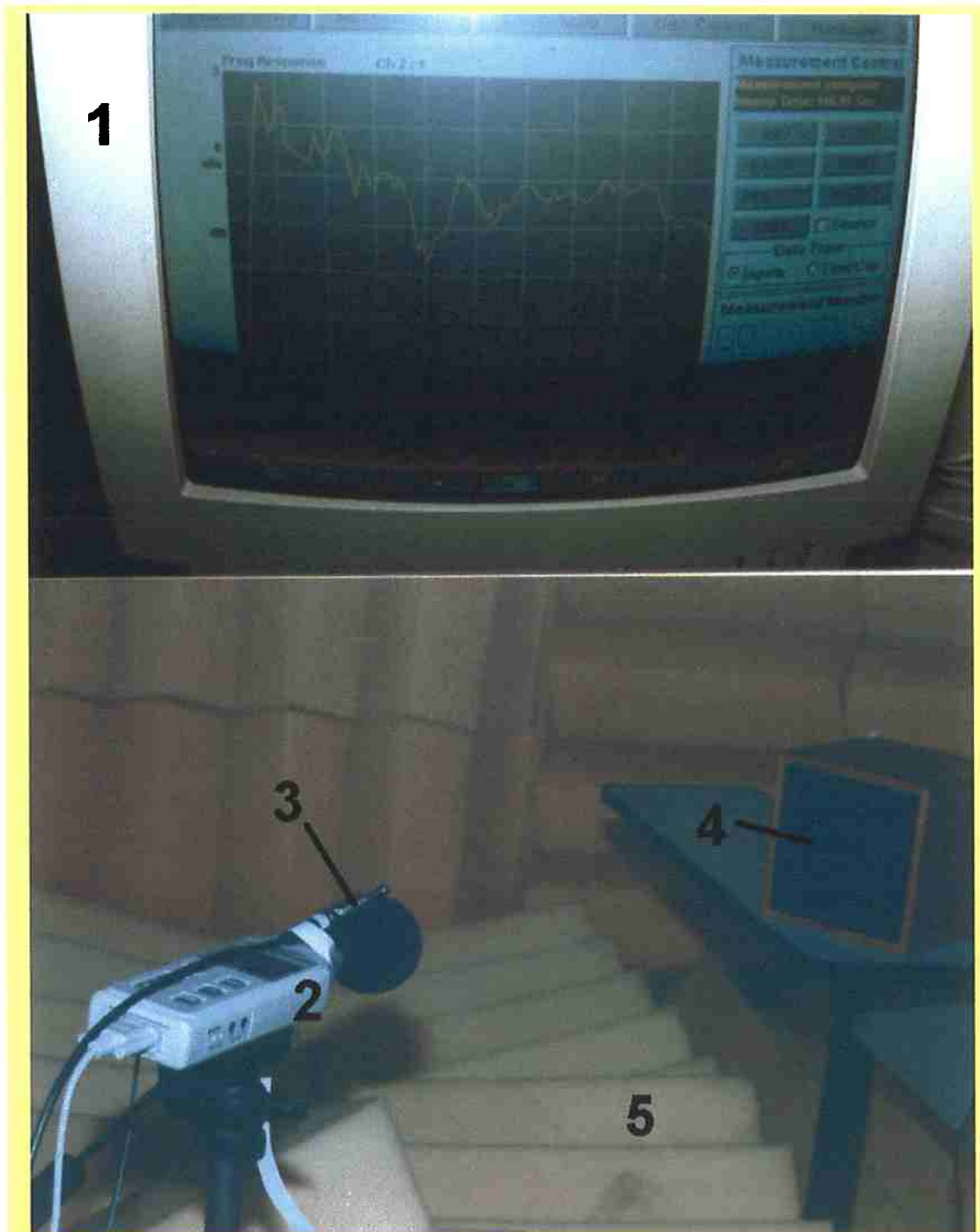


Figura 139. Sistema de aquisição de dados e bancada de aferição do decibelímetro
1. Sistema de aquisição de dados acoplado a microcomputador
2. Decibelímetro Minipa MSL-1352 3. Microfone de eletreto (sem capa esférica de espuma, de 6,35 mm) utilizado na aferição 4. Alto-falante emissor do sinal sonoro senoidal gerado 5. Revestimento em espuma da câmara semi-aneecóica utilizada na aferição

C.2. Metodologia

A seqüência utilizada na aferição dos sinais sonoros de entrada e saídas do decibelímetro e microfone de aferição utilizados, acha-se apresentada na Tabela 37.

Utilizou-se um equipamento de condicionador de sinal da marca PCB, modelo 482-A05 e um sistema de aquisição de dados da marca HP, modelo 3565, ambos fabricados nos Estados Unidos da América. O amplificador de potência, de procedência inglesa, era da marca LDS, modelo PA25E. O alto-falante, de seis polegadas, era de procedência brasileira.

Tabela 37. Caracterização metodológica da aferição do Decibelímetro

Medida	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
Sinal sonoro de entrada								
Tensão do Sinal Sonoro	0,1 V	0,5 V	1,0 V	2,0 V	3,0 V	4,0 V	5,0 V	
Sinal de entrada	Aumento da freqüência em Rampa							
Duração do pulso	1 segundo, por freqüência, na faixa de 0 a 10 kHz, com discretização de 128 bandas						Discretização de 1024 bandas	
Sinal sonoro captado e tratado pelo sistema interno do Decibelímetro								
Registrado, via Interface RS-232, o sinal sonoro [dB] no domínio do tempo								
Sinal sonoro captado pelo Microfone, levado ao sistema de Aquisição e processado através de recursos do Matlab								
1. Esboço do sinal senoidal de entrada								
2. Determinação da Densidade Espectral de Potência (DEP) do sinal fornecido								
3. Determinação da Função Resposta em Freqüência (FRF)								
4. Determinação da Densidade Espectral de Potência (DEP) do sinal captado								
5. Esboço das curvas acima								

C.3. Caracterização dos sinais de entrada/saída na aferição

As Figuras 140 a 154 seguintes dizem respeito aos resultados obtidos relativos às medidas M1 a M8, caracterizadas na Tabela 37.

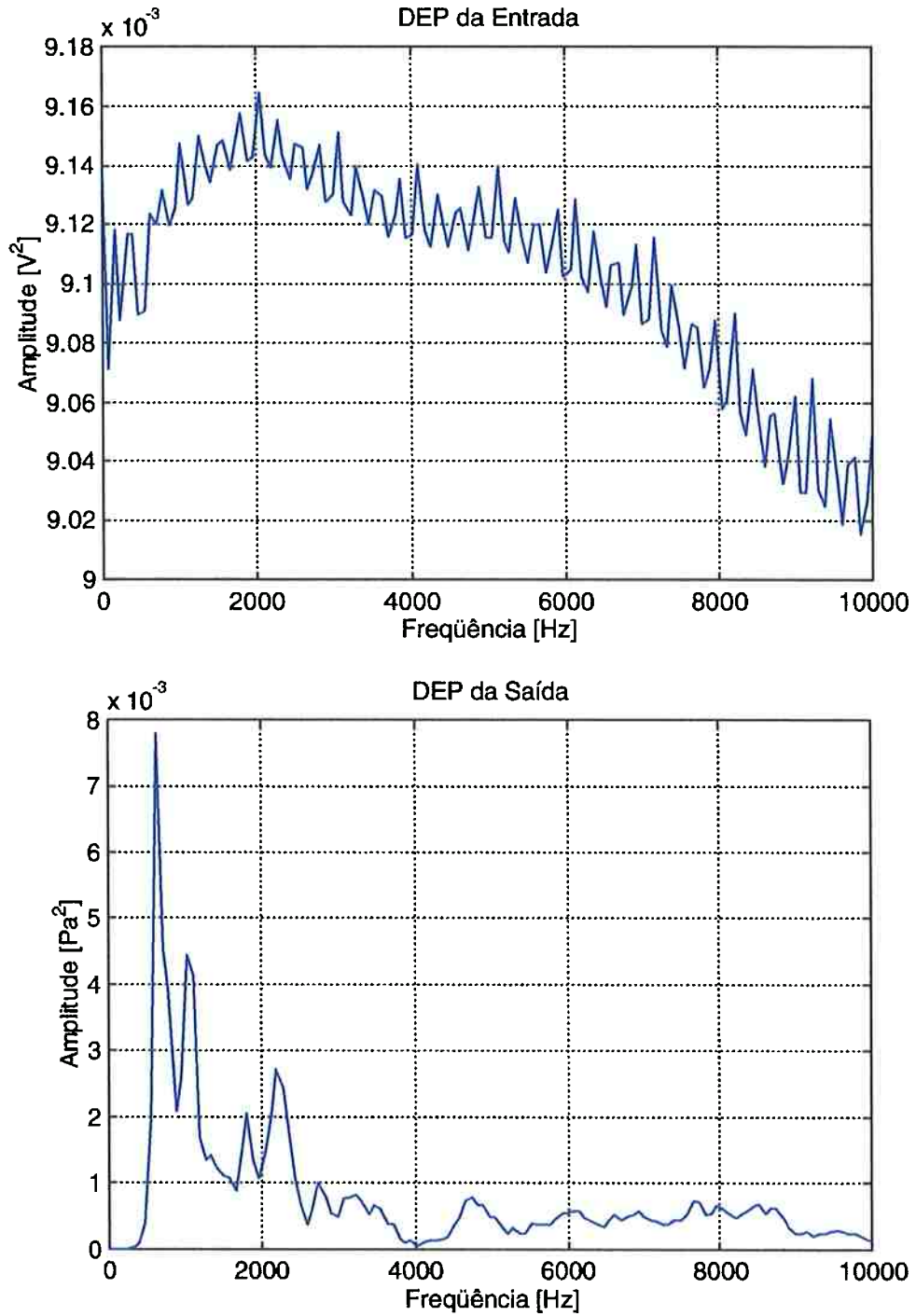


Figura 140. Densidade espectral de potência (DEP) dos sinais sonoros do alto-falante (entrada) e do microfone de aferição (saída), na medida M1 (0,1 Volt)

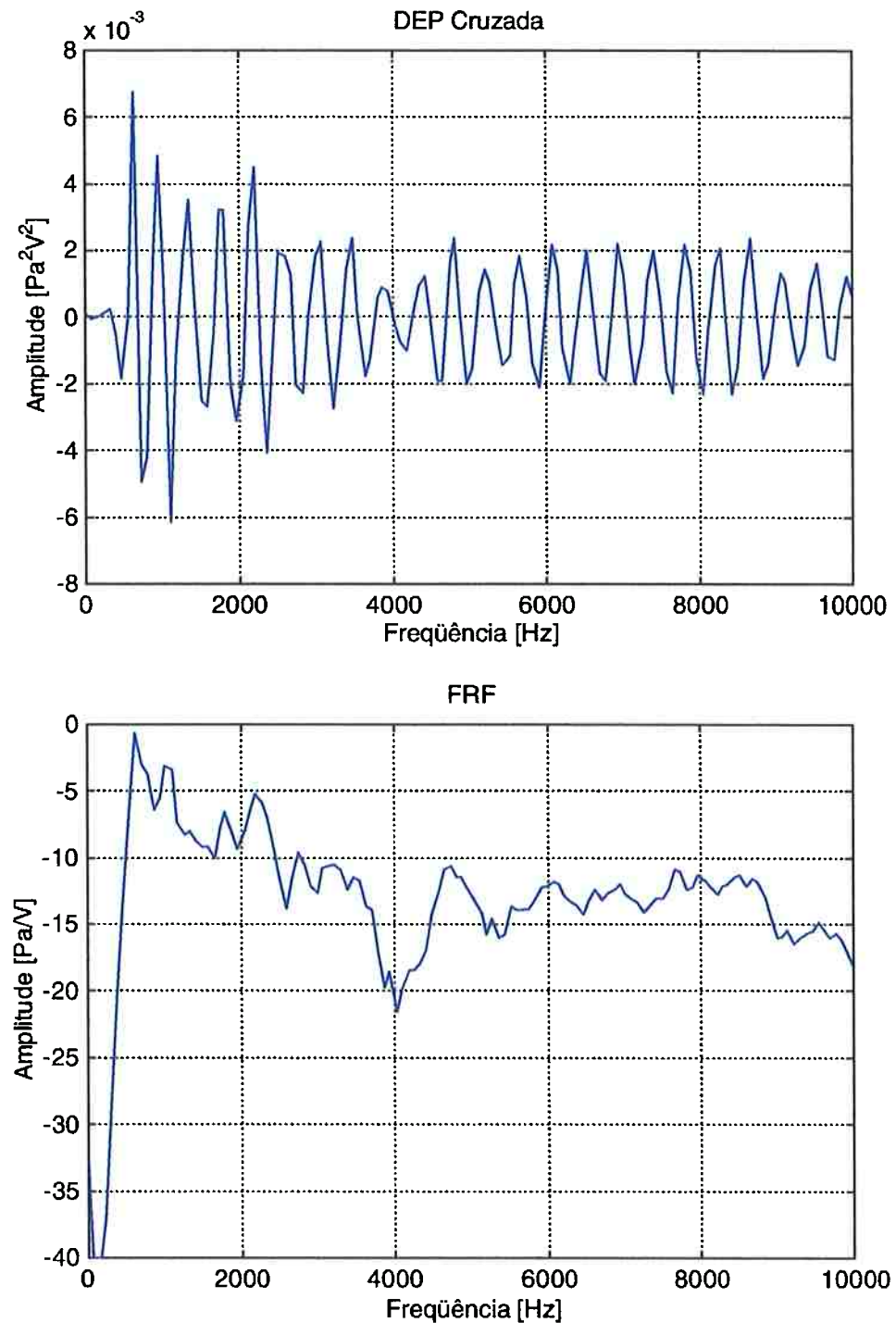


Figura 141. Correlação cruzada entre a densidade espectral de potência (DEP) dos sinais sonoros do alto-falante (entrada) e do microfone de aferição (saída) e função resposta em frequência (FRF), na medida M1 (0,1 Volt)

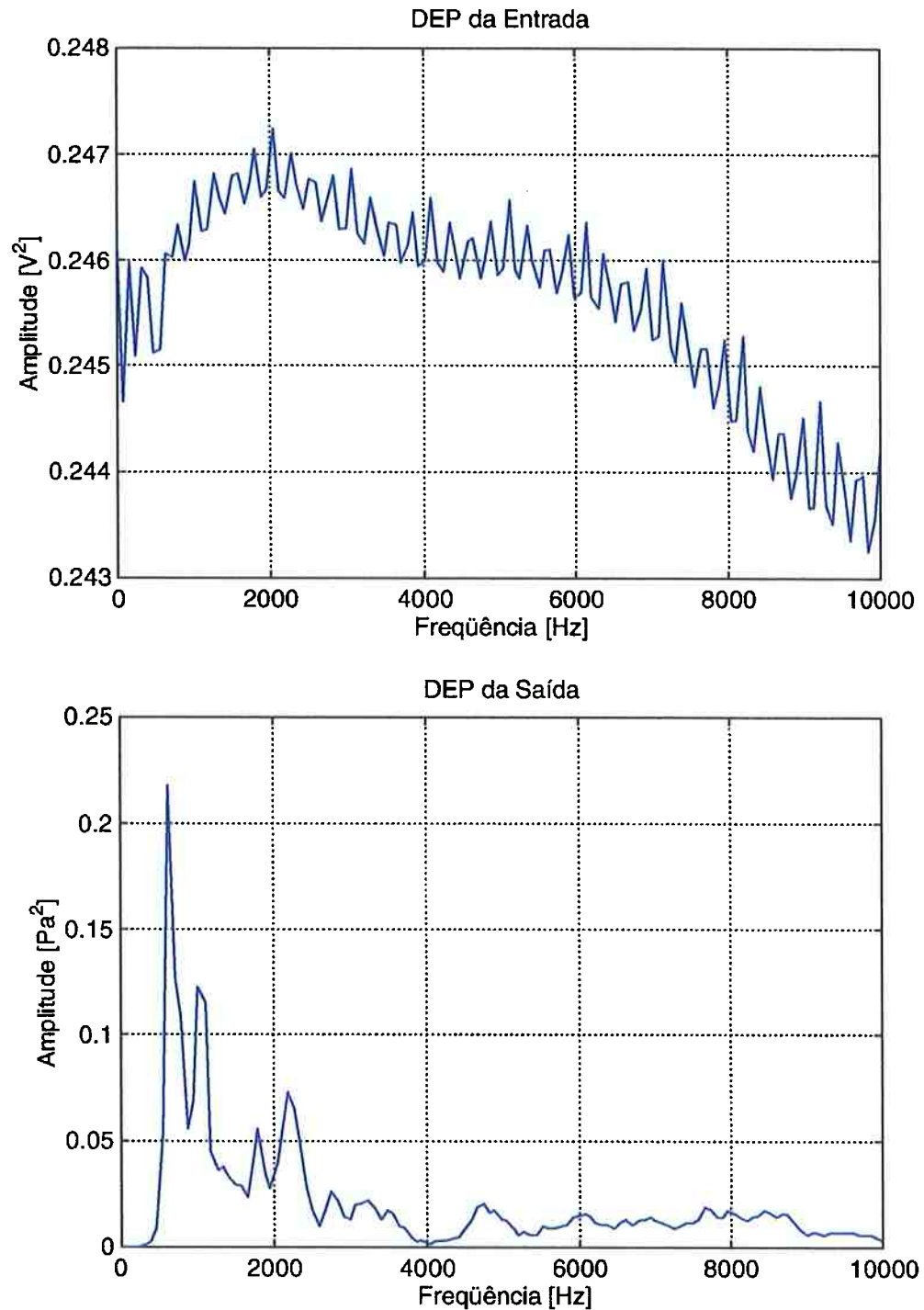


Figura 142. Densidade espectral de potência (DEP) dos sinais sonoros do alto-falante (entrada) e do microfone de aferição (saída), na medida M2 (0,5 Volt)

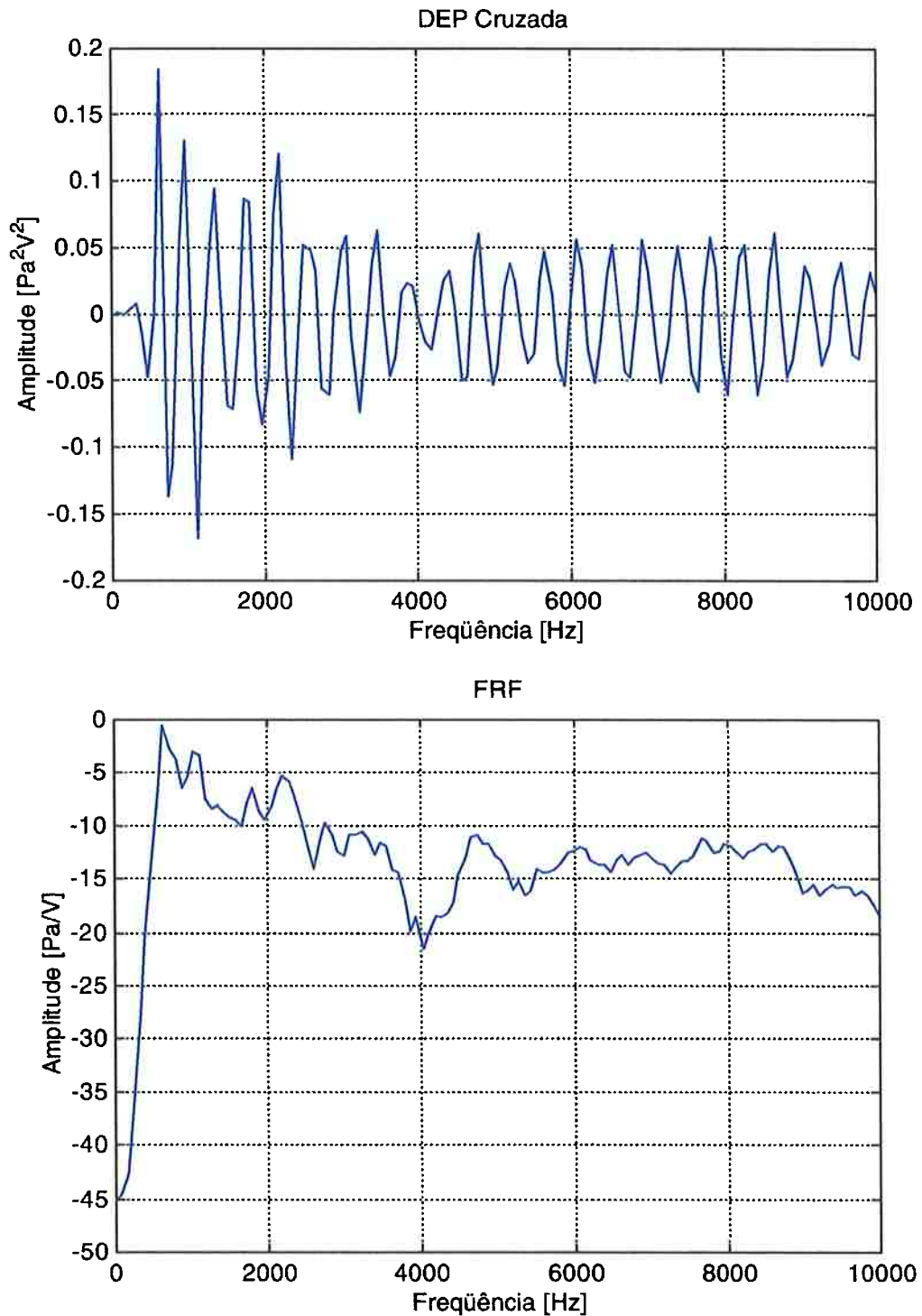


Figura 143. Correlação cruzada entre a densidade espectral de potência (DEP) dos sinais sonoros do alto-falante (entrada) e do microfone de aferição (saída) e função resposta em freqüência (FRF), na medida M2 (0,5 Volt)

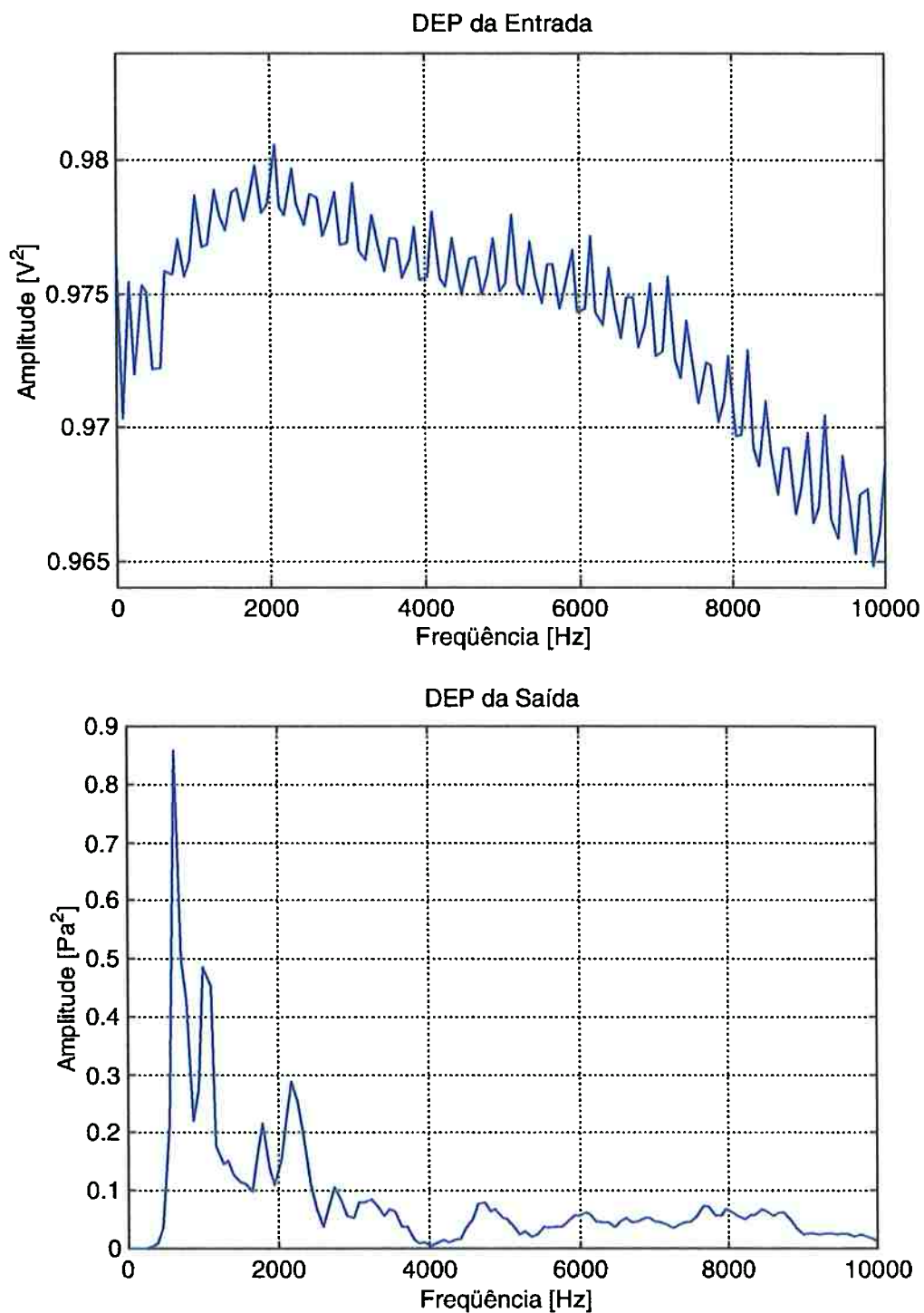


Figura 144. Densidade espectral de potência (DEP) dos sinais sonoros do alto-falante (entrada) e do microfone de aferição (saída), na medida M3 (1,0 Volt)

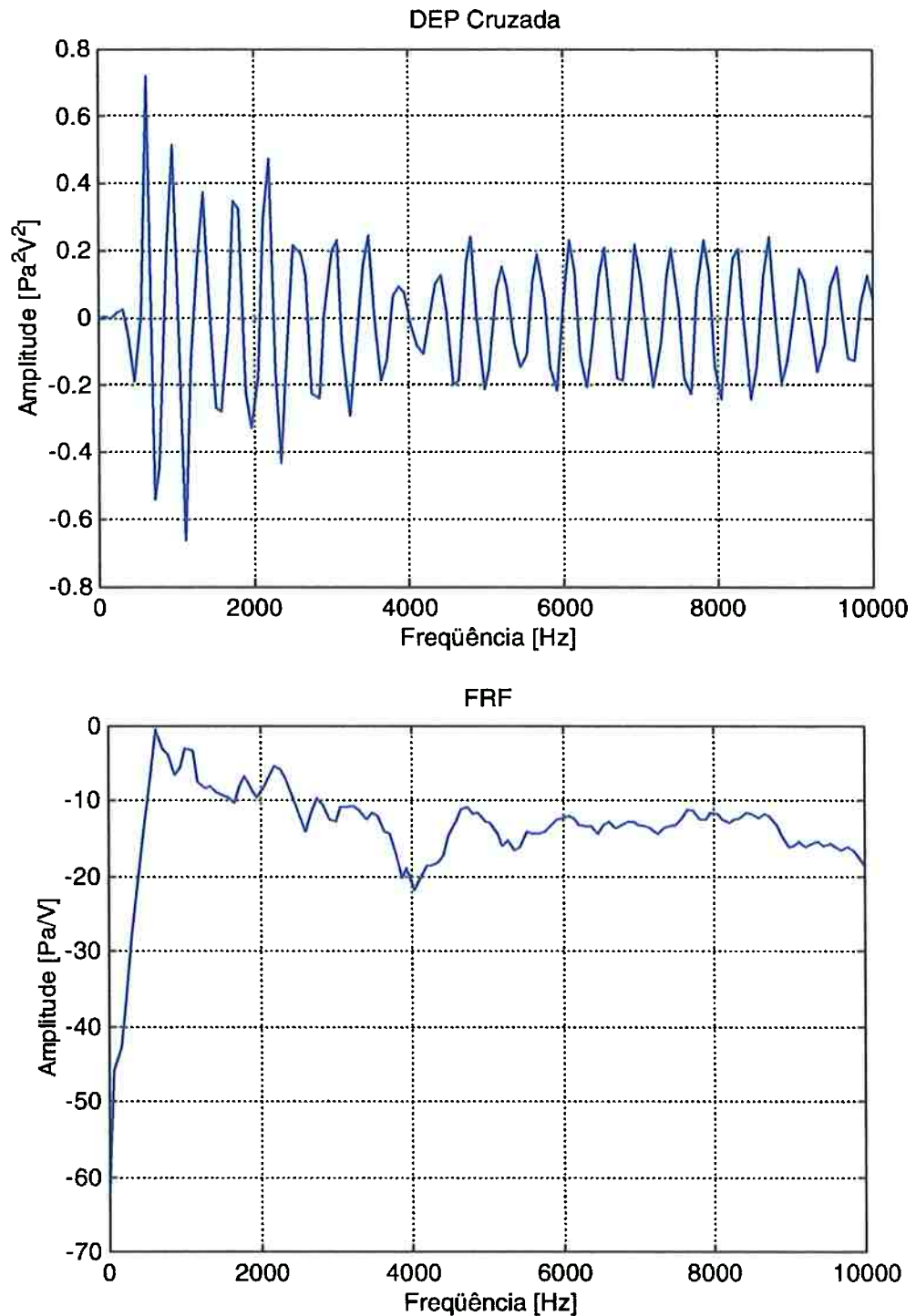


Figura 145. Correlação cruzada entre a densidade espectral de potência (DEP) dos sinais sonoros do alto-falante (entrada) e do microfone de aferição (saída) e função resposta em frequência (FRF), na medida M3 (1,0 Volt)

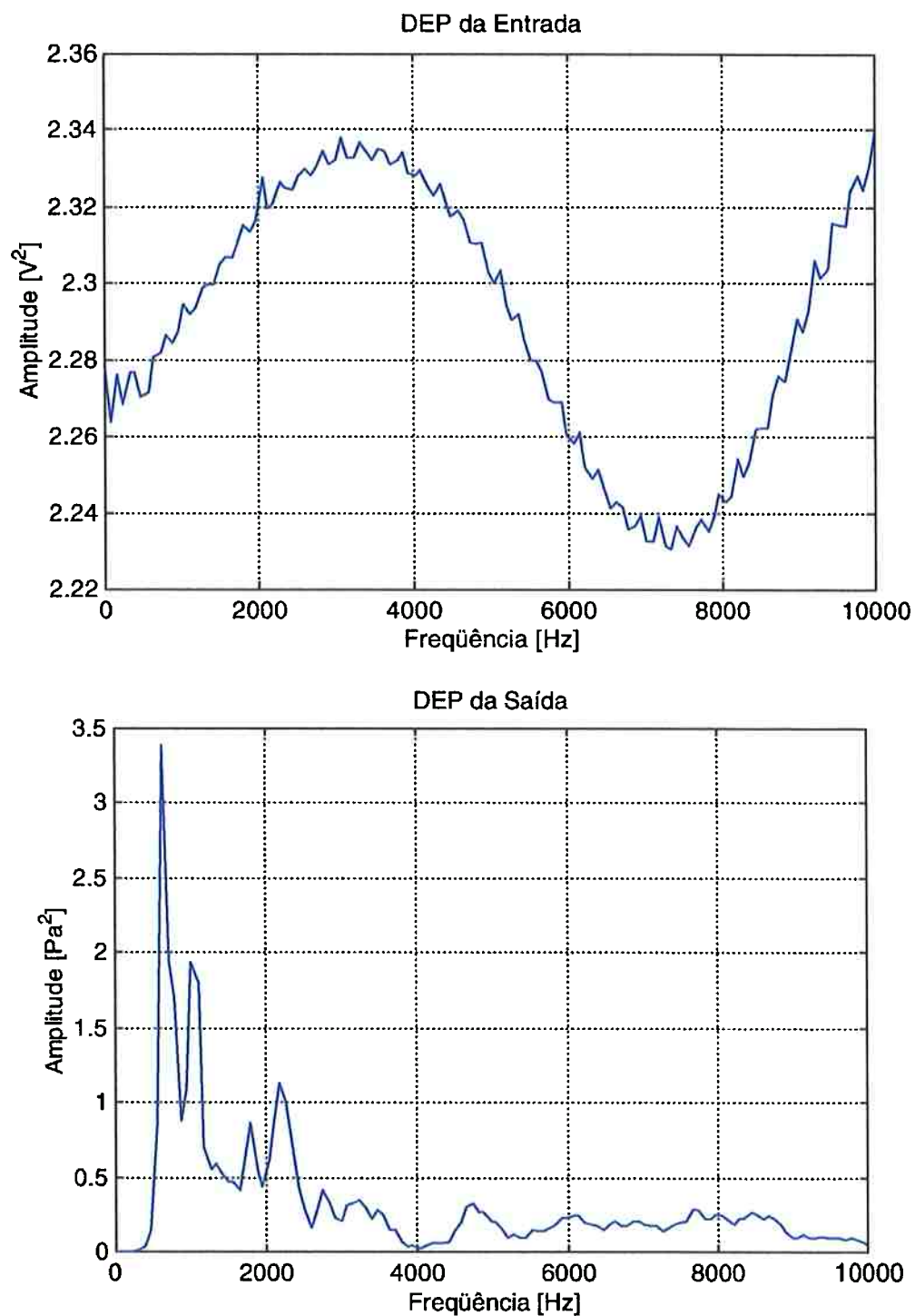


Figura 146. Densidade espectral de potência (DEP) dos sinais sonoros do alto-falante (entrada) e do microfone de aferição (saída), na medida M4 (2,0 Volts)

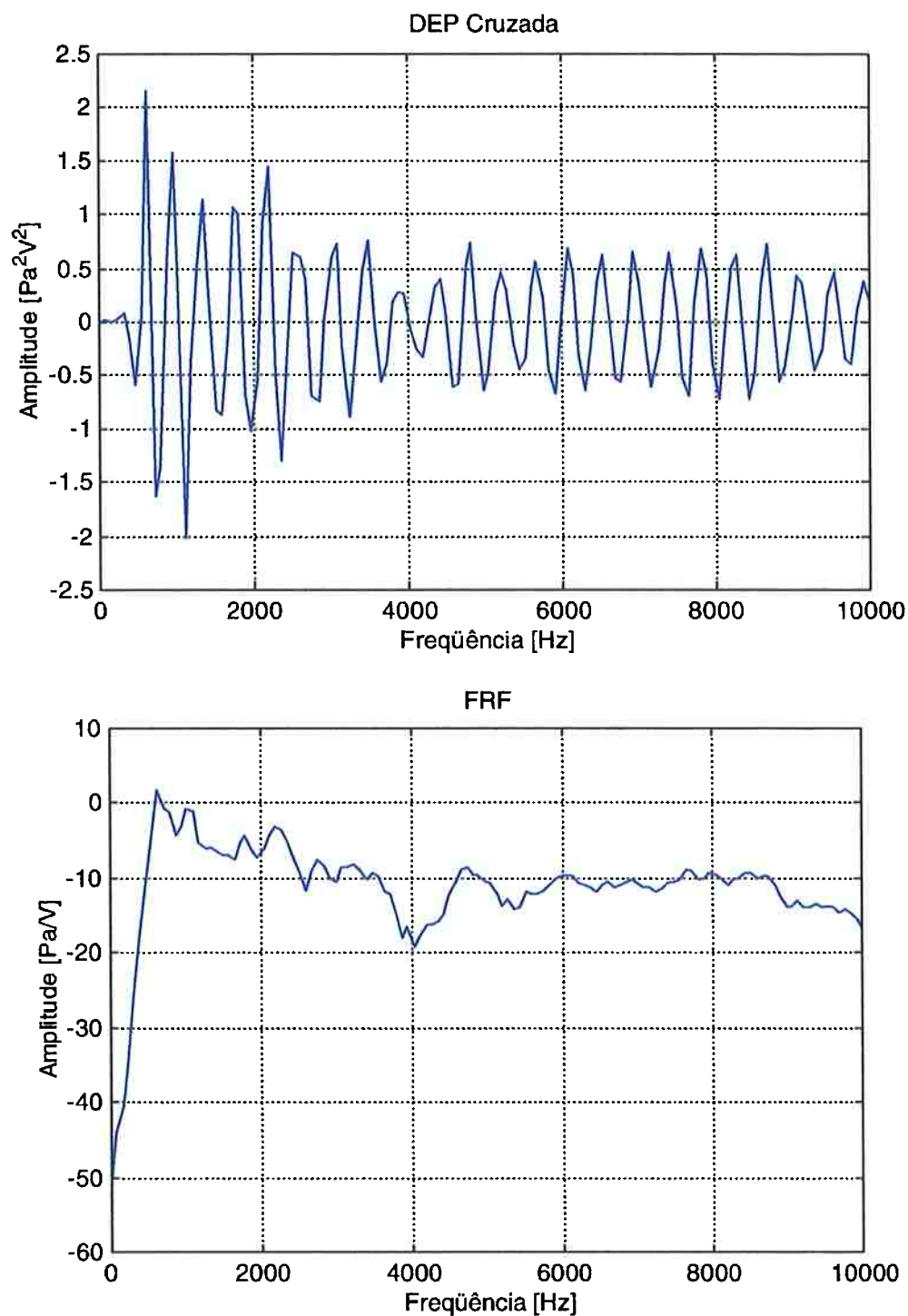


Figura 147. Correlação cruzada entre a densidade espectral de potência (DEP) dos sinais sonoros do alto-falante (entrada) e do microfone de aferição (saída) e função resposta em frequência (FRF), na medida M4 (2,0 Volts)

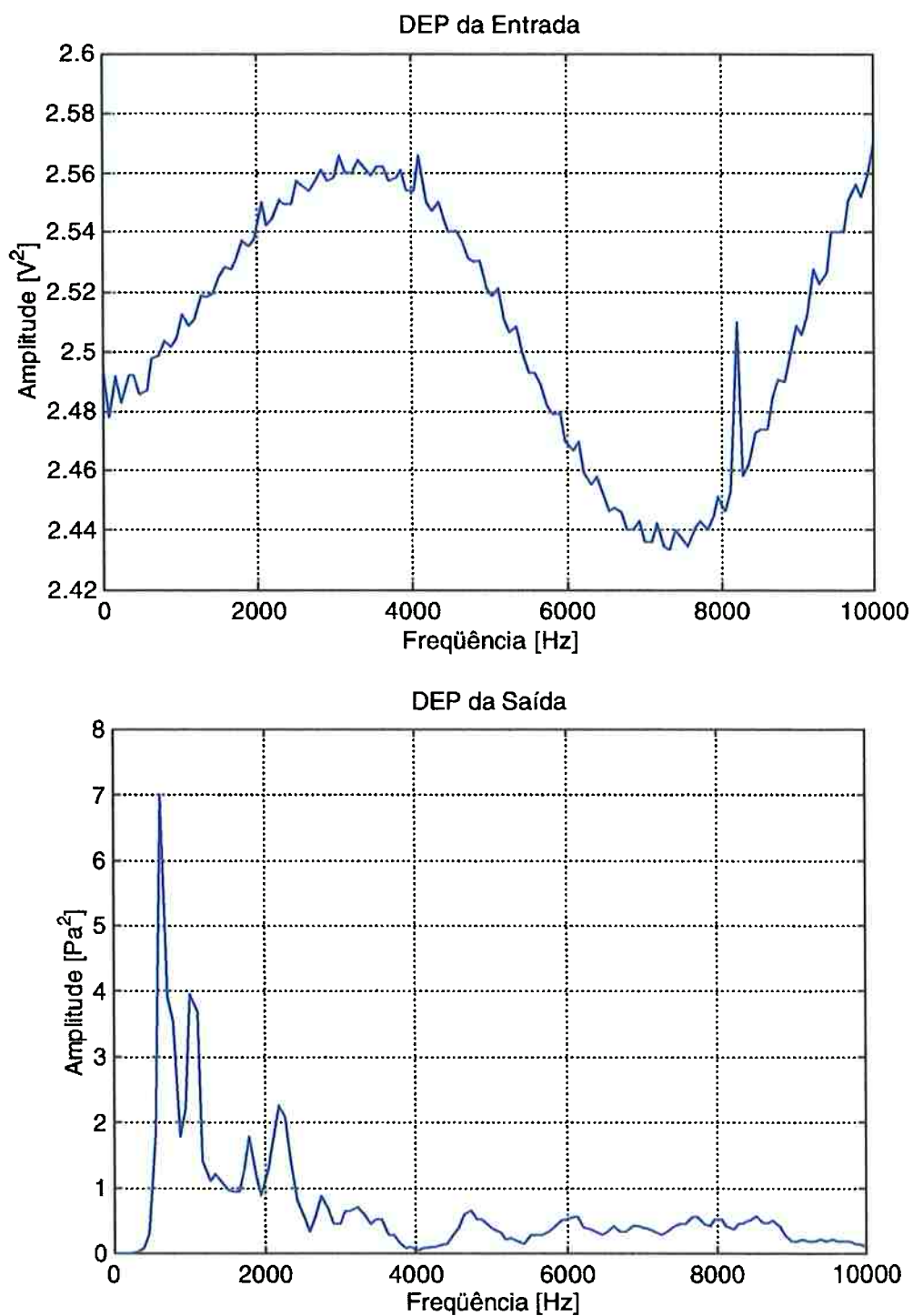


Figura 148. Densidade espectral de potência (DEP) dos sinais sonoros do alto-falante (entrada) e do microfone de aferição (saída), na medida M5 (3,0 Volts)

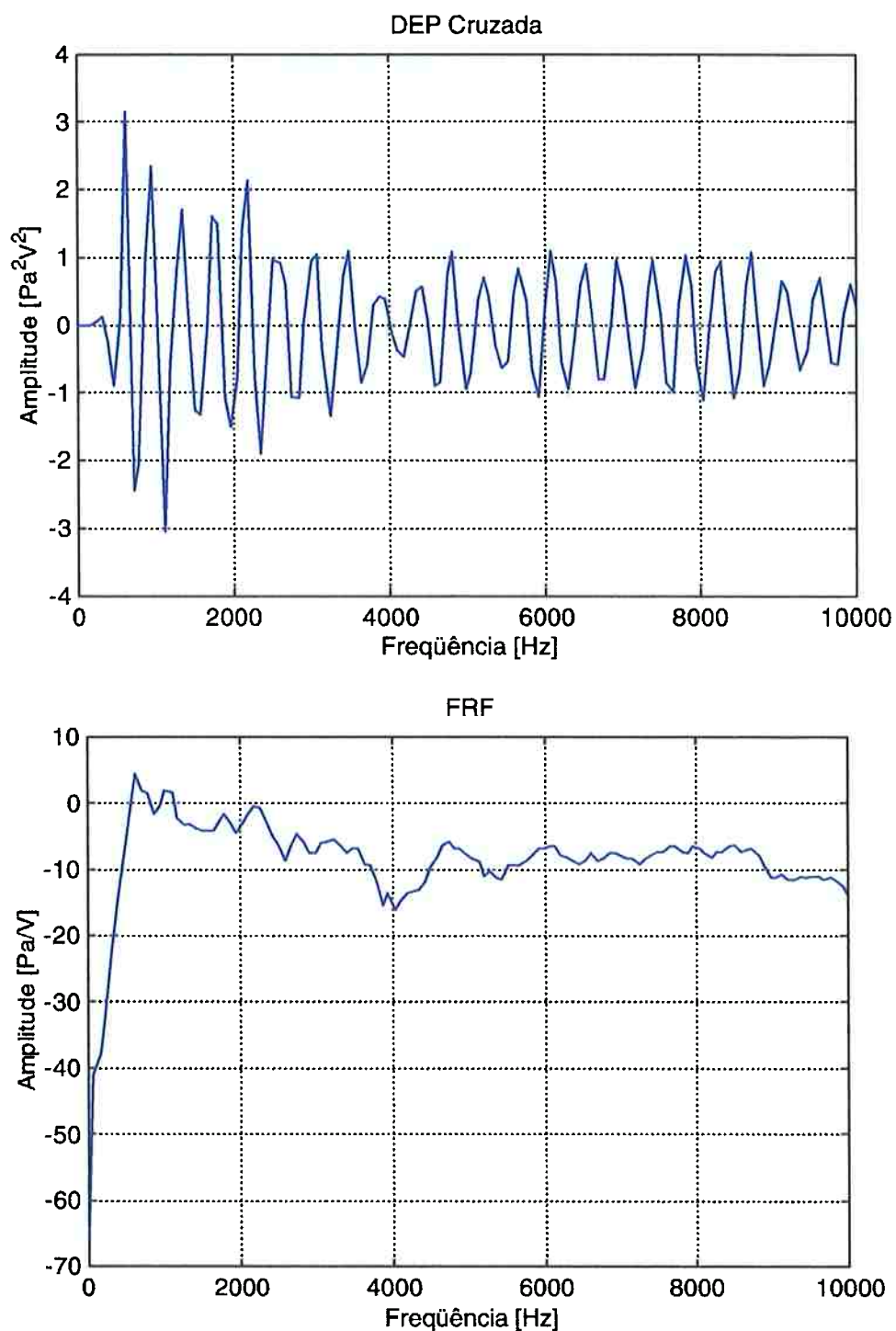


Figura 149. Correlação cruzada entre a densidade espectral de potência (DEP) dos sinais sonoros do alto-falante (entrada) e do microfone de aferição (saída) e função resposta em freqüência (FRF), na medida M5 (3,0 Volts)

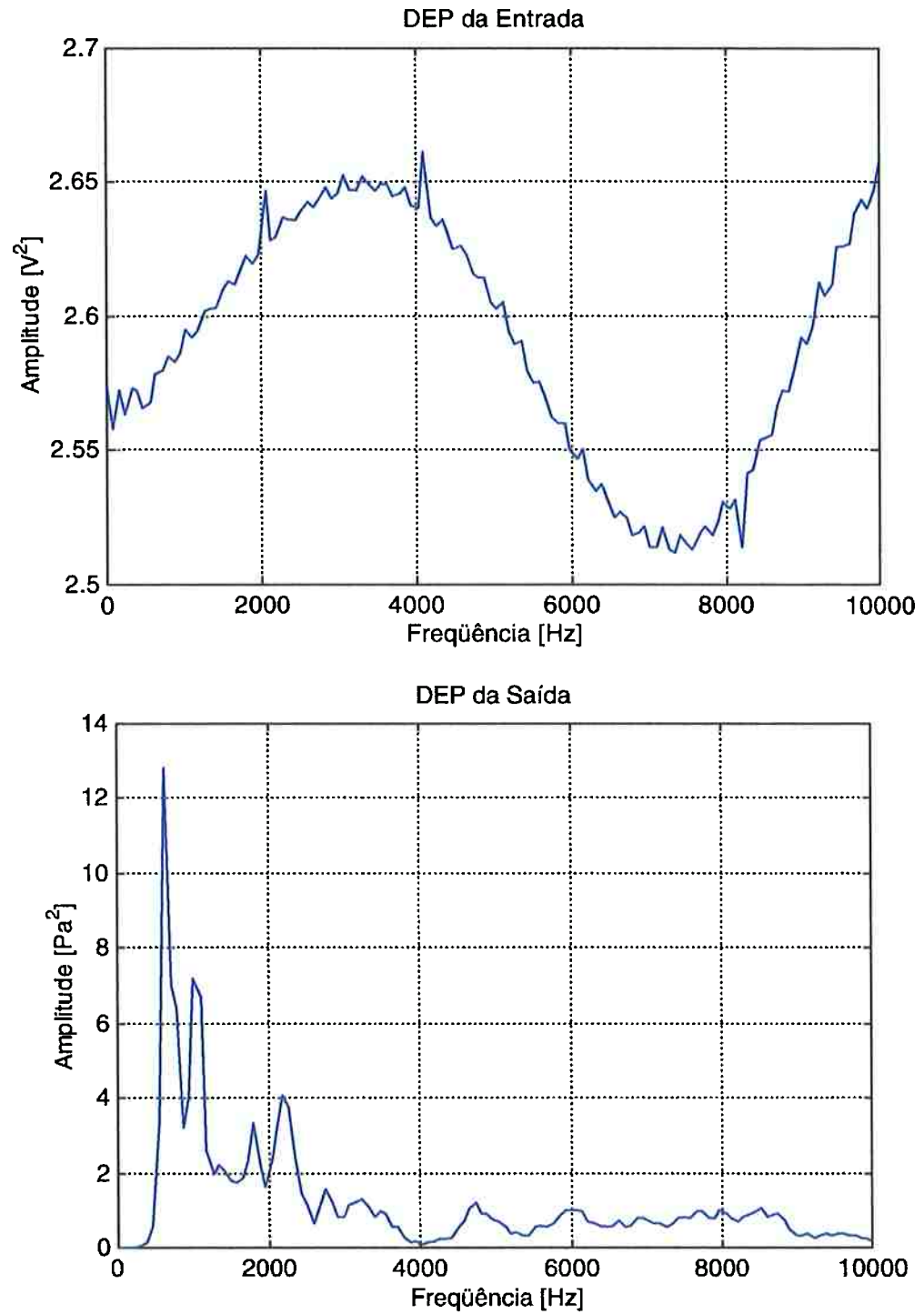


Figura 150. Densidade espectral de potência (DEP) dos sinais sonoros do alto-falante (entrada) e do microfone de aferição (saída), na medida M6 (4,0 Volts)

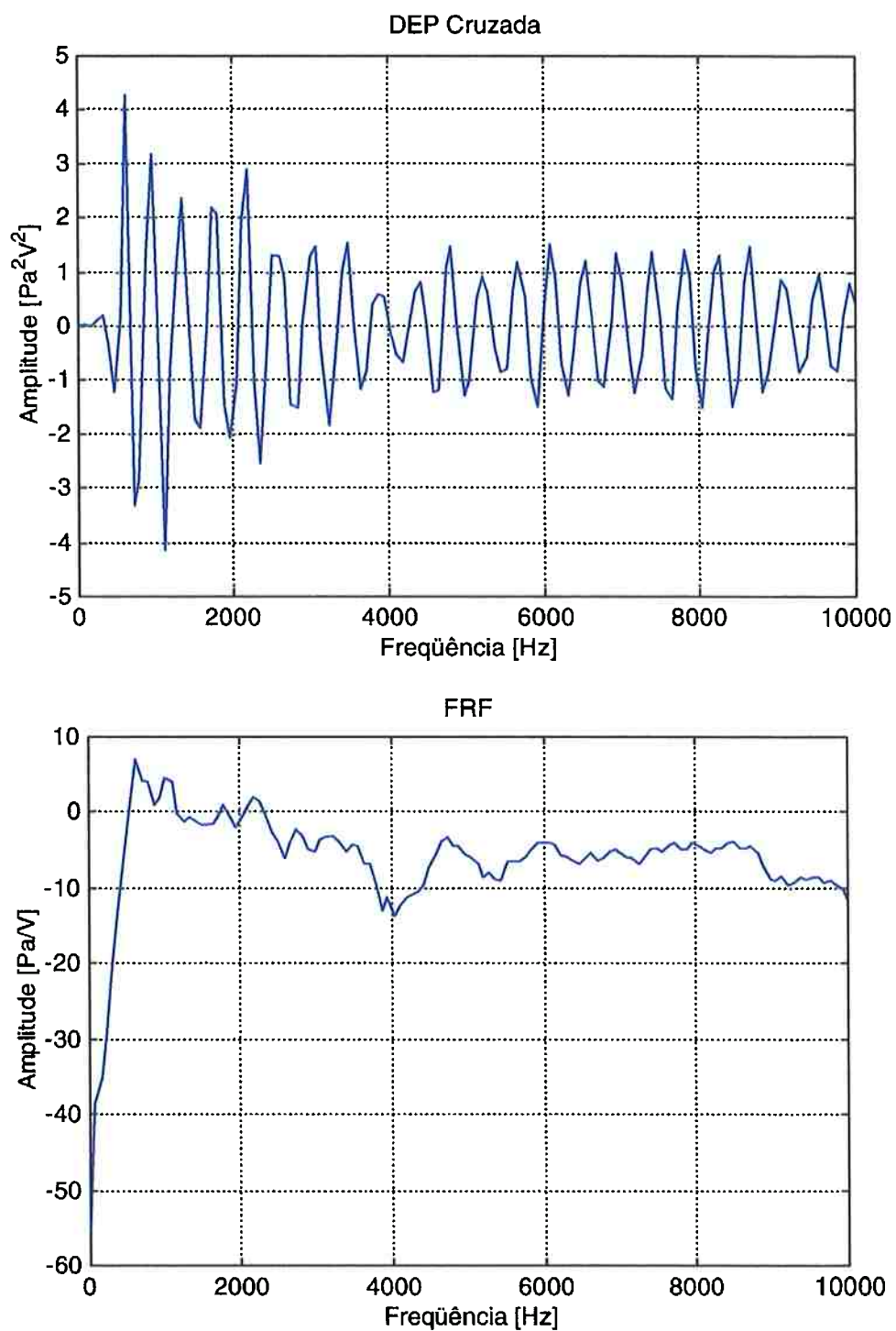


Figura 151. Correlação cruzada entre a densidade espectral de potência (DEP) dos sinais sonoros do alto-falante (entrada) e do microfone de aferição (saída) e função resposta em frequência (FRF), na medida M6 (4,0 Volts)

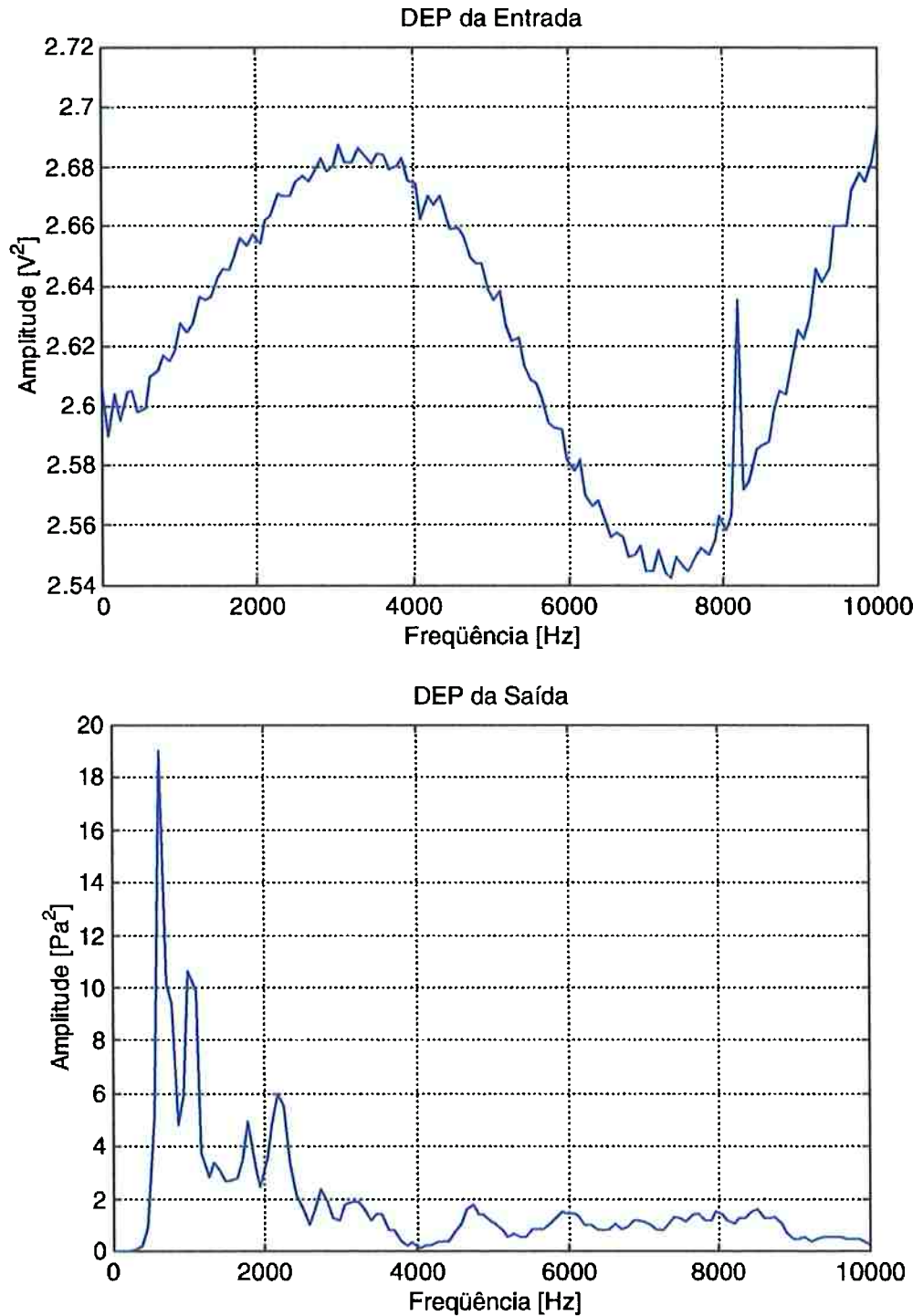


Figura 152. Densidade espectral de potência (DEP) dos sinais sonoros do alto-falante (entrada) e do microfone de aferição (saída), na medida M7 (5,0 Volts)

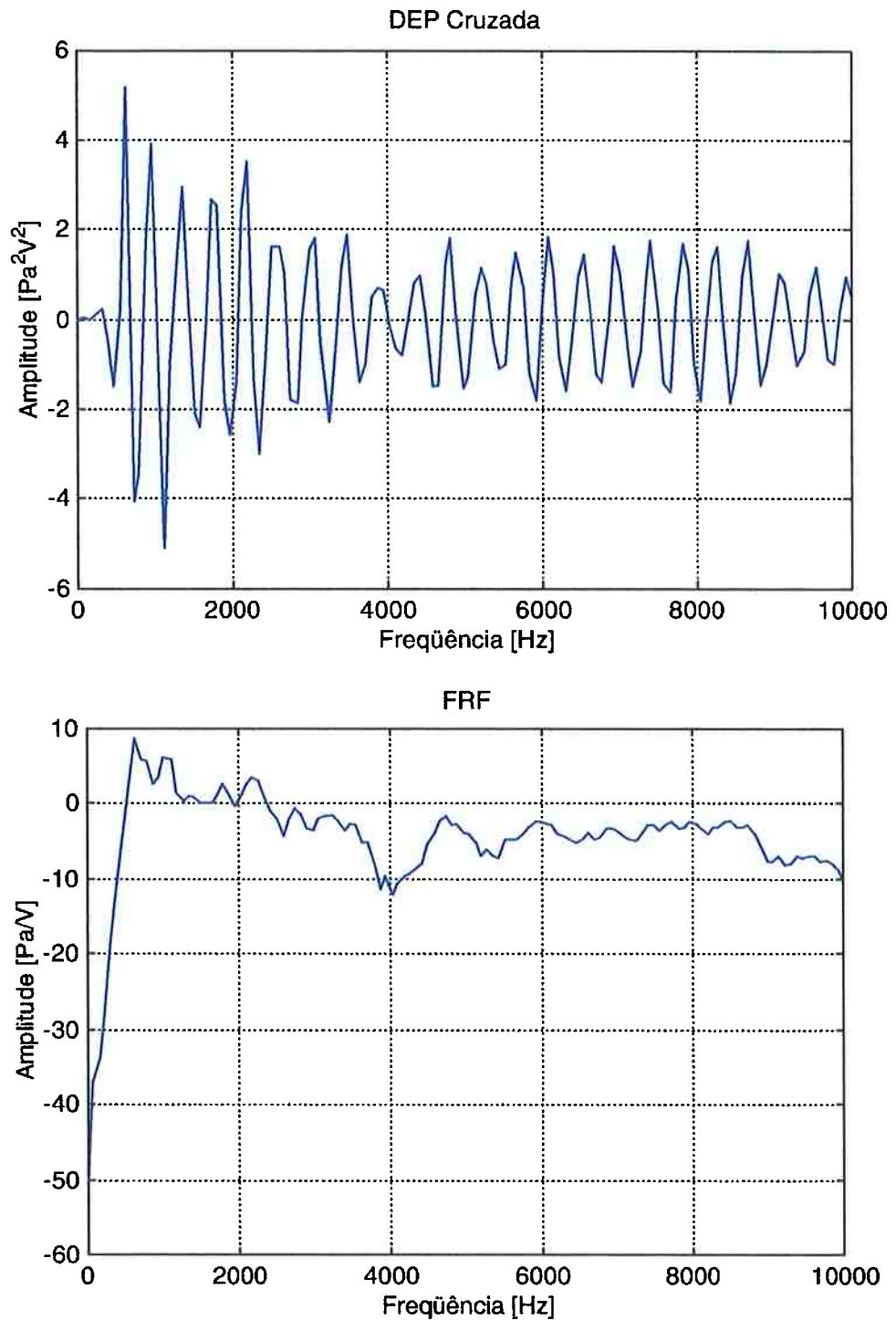


Figura 153. Correlação cruzada entre a densidade espectral de potência (DEP) dos sinais sonoros do alto-falante (entrada) e do microfone de aferição (saída) e função resposta em frequência (FRF), na medida M7 (5,0 Volts)

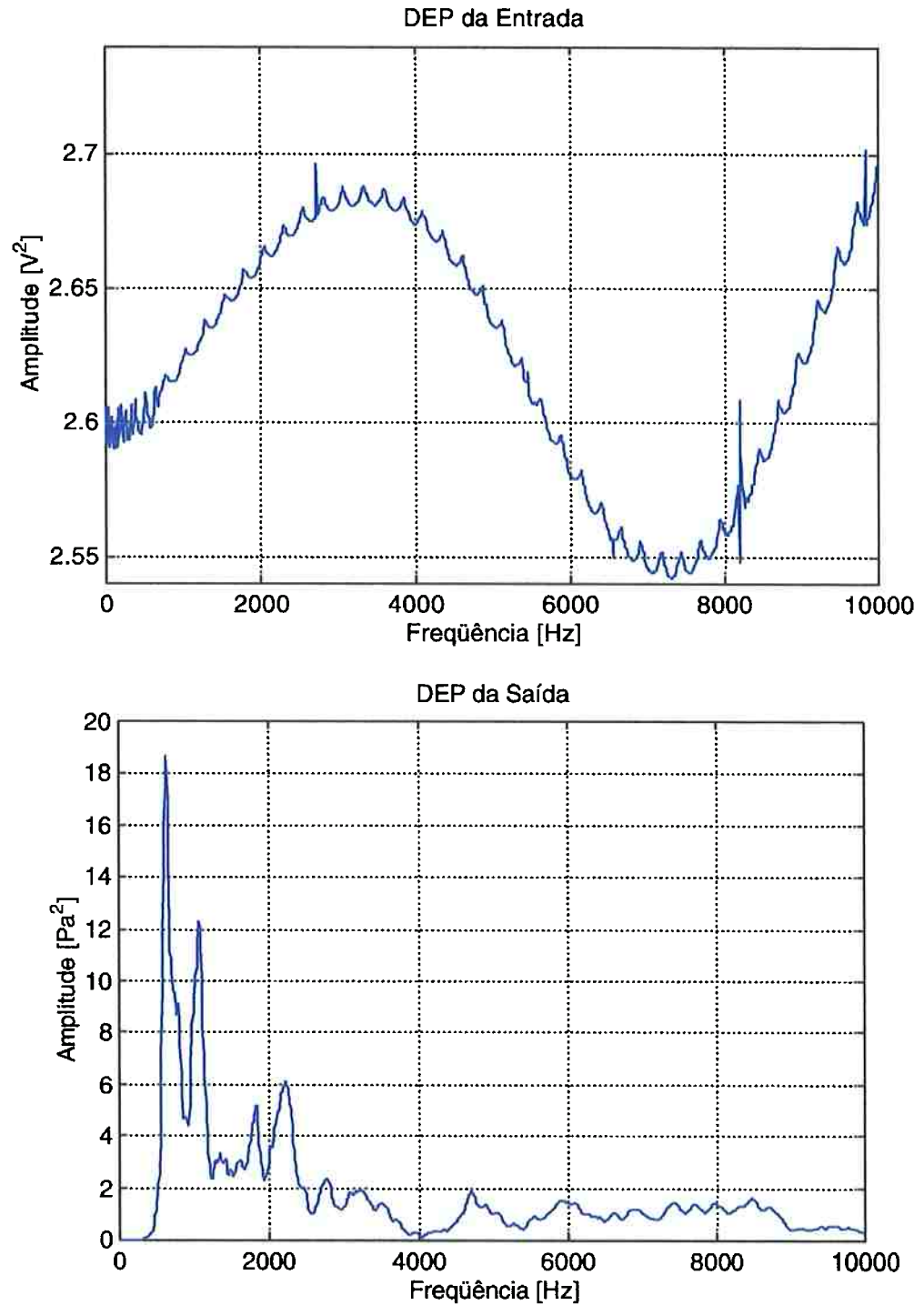


Figura 154. Densidade espectral de potência (DEP) dos sinais sonoros do alto-falante (entrada) e do microfone de aferição (saída), na medida M8 (5,0 Volts)

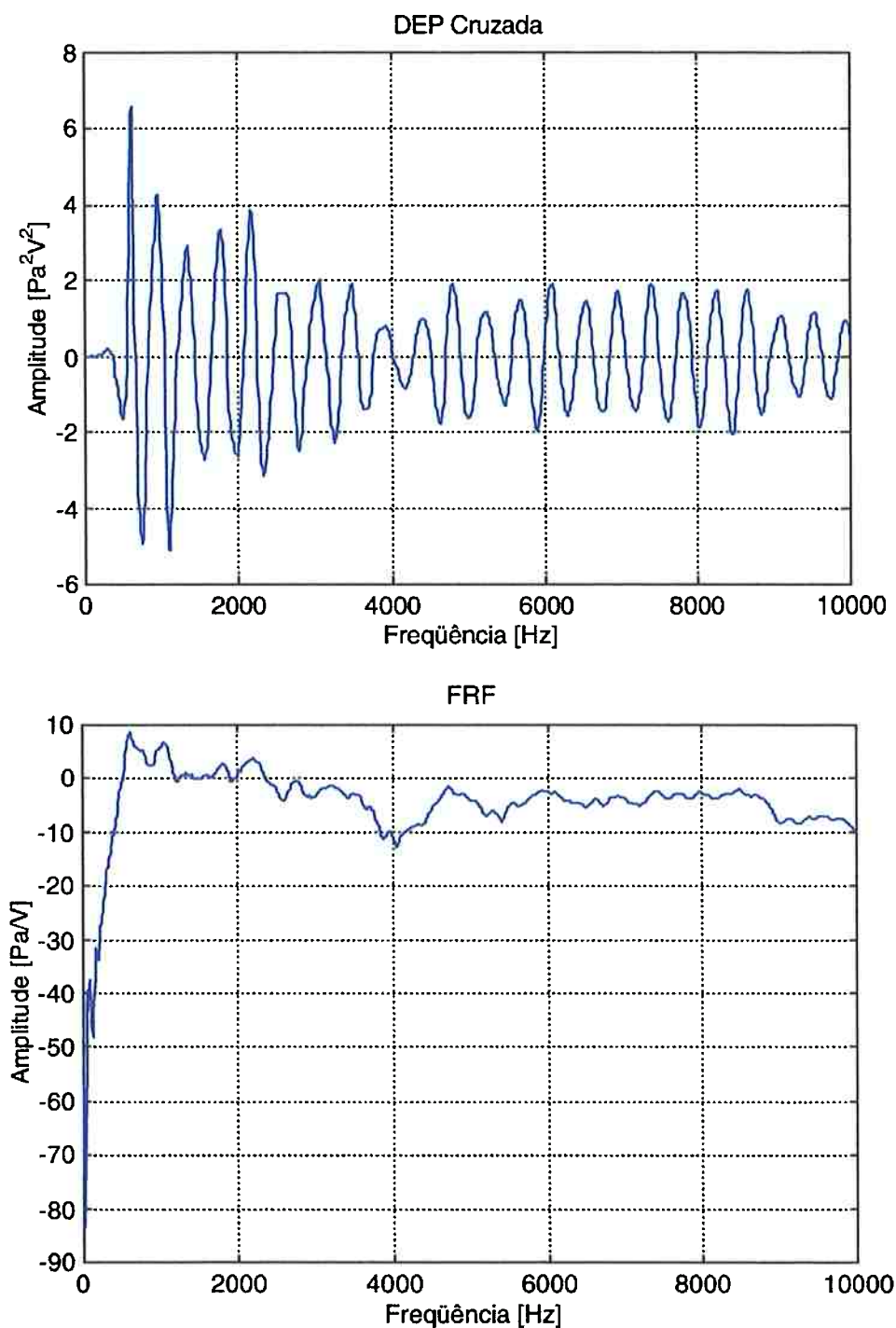


Figura 155. Correlação cruzada entre a densidade espectral de potência (DEP) dos sinais sonoros do alto-falante (entrada) e do microfone de aferição (saída) e função resposta em frequência (FRF), na medida M8 (5,0 Volts)

C.4. Resposta do Medidor de Pressão Sonora (“Sound Pressure Meter” [SPM]), ou decibelímetro, às entradas sonoras

A medida da pressão do ar atmosférico executada pelo Decibelímetro Minipa utilizado neste trabalho é executada através de um sistema de medidas esboçado na Figura 156, cujo sensor primário é um microfone de eletreto, que é um conversor da variável *pressão do fluido “ar atmosférico”* em *tensão elétrica*.

De acordo com os dados do fabricante, o valor RMS de fundo de escala da tensão elétrica é de 0,707 Volts CA. Adotou-se uma amplitude de variação dos sinais de entrada desde 0,1 até 5,0 Volts.

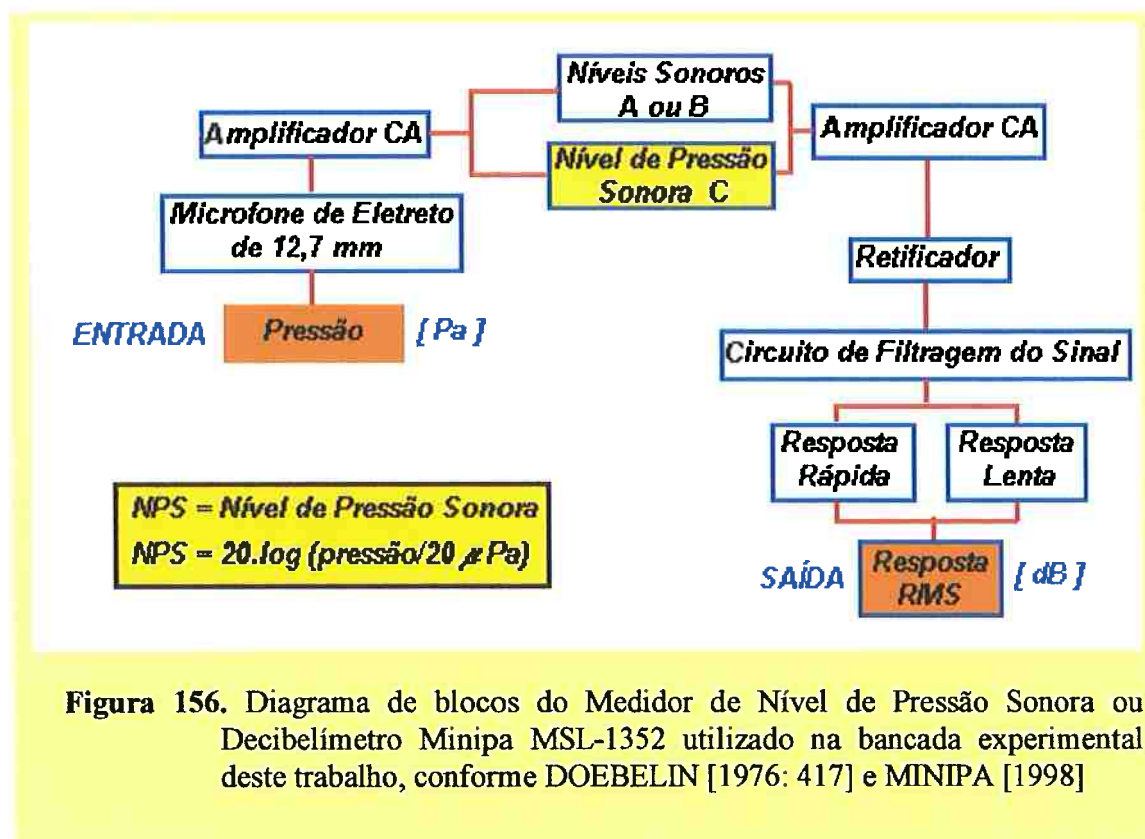


Figura 156. Diagrama de blocos do Medidor de Nível de Pressão Sonora ou Decibelímetro Minipa MSL-1352 utilizado na bancada experimental deste trabalho, conforme DOEBELIN [1976: 417] e MINIPA [1998]

A Figura 157 diz respeito à *resposta rápida* da *Escala C (Nível de Pressão Sonora)* do Decibelímetro a um sinal de entrada de 0,1 Volt, descrito pelas Figuras 140 e 141. Analogamente, a Figura 158 concerne a uma entrada de 0,5 Volt e às Figuras 142 e 143 e, assim, sucessivamente.

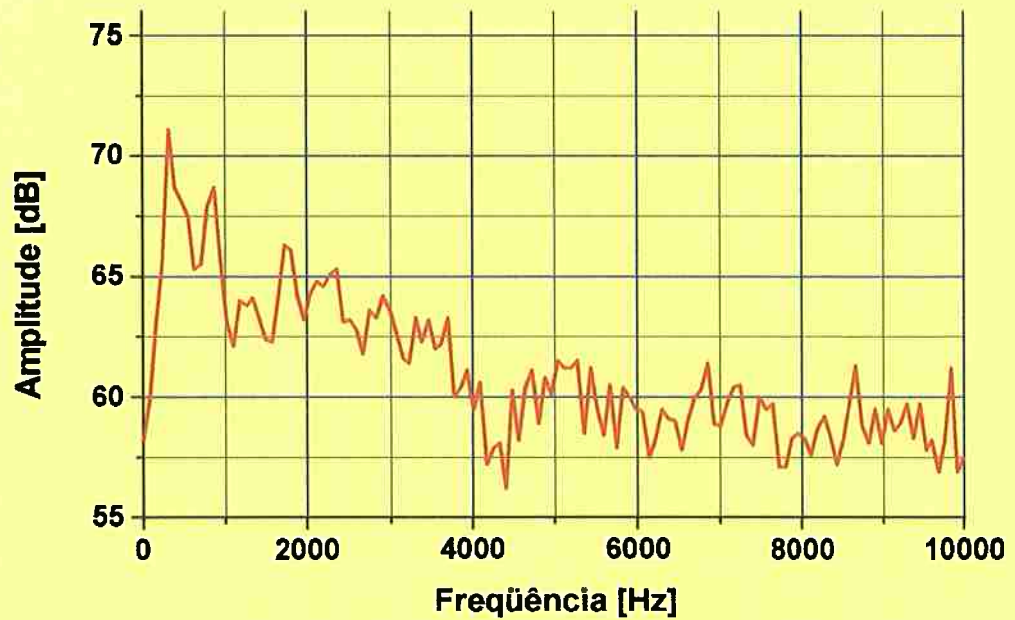


Figura 157. Amplitude da resposta, no domínio da frequência, do Decibelímetro Minipa MSL-1352, na medida M1 (entrada de 0,1 Volt)

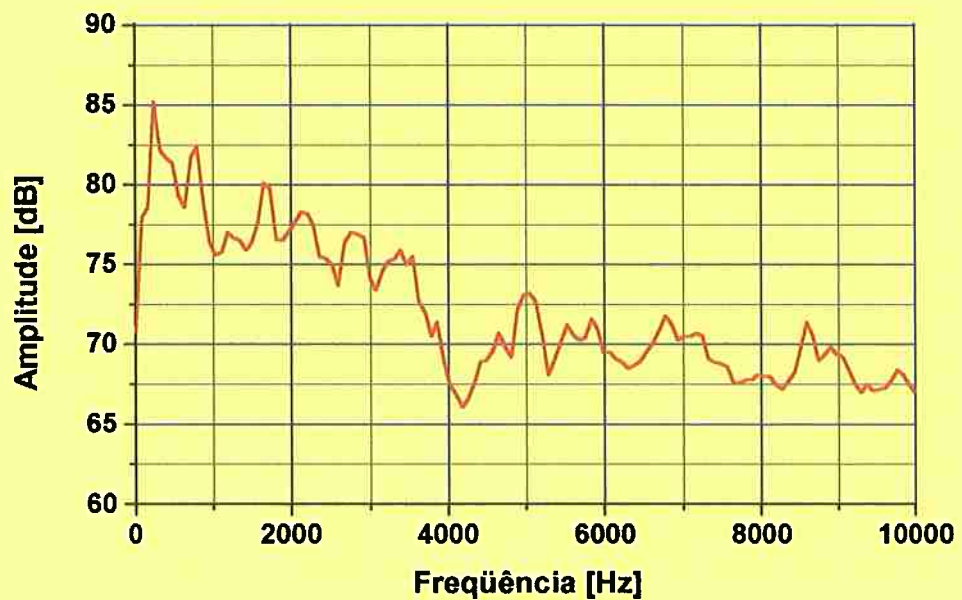


Figura 158. Amplitude da resposta, no domínio da frequência, do Decibelímetro Minipa MSL-1352, na medida M2 (entrada de 0,5 Volt)

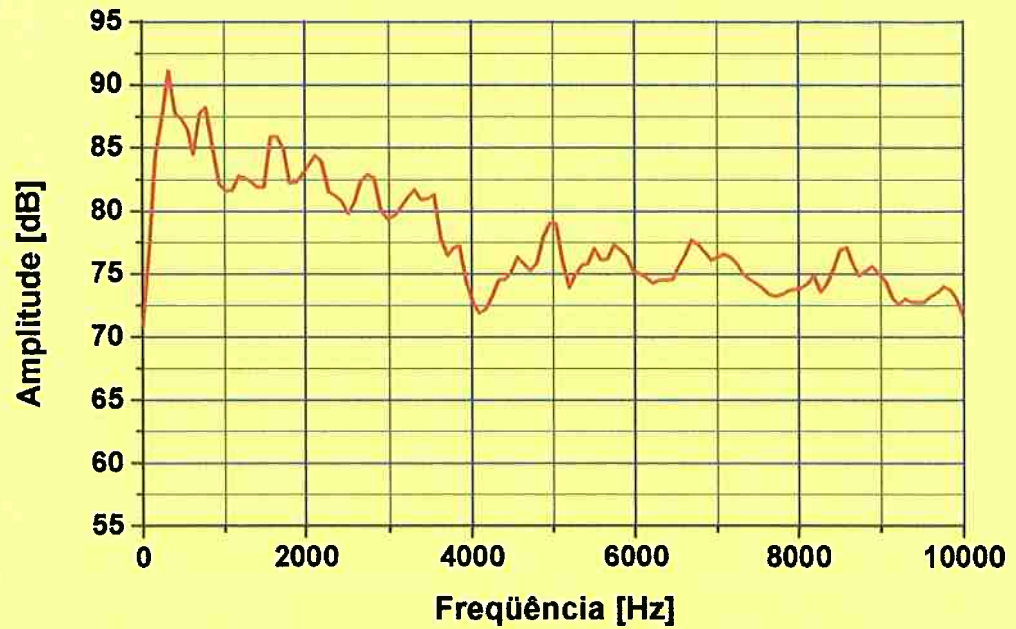


Figura 159. Amplitude da resposta, no domínio da freqüência, do Decibelímetro Minipa MSL-1352, na medida M3 (entrada de 1,0 Volt)

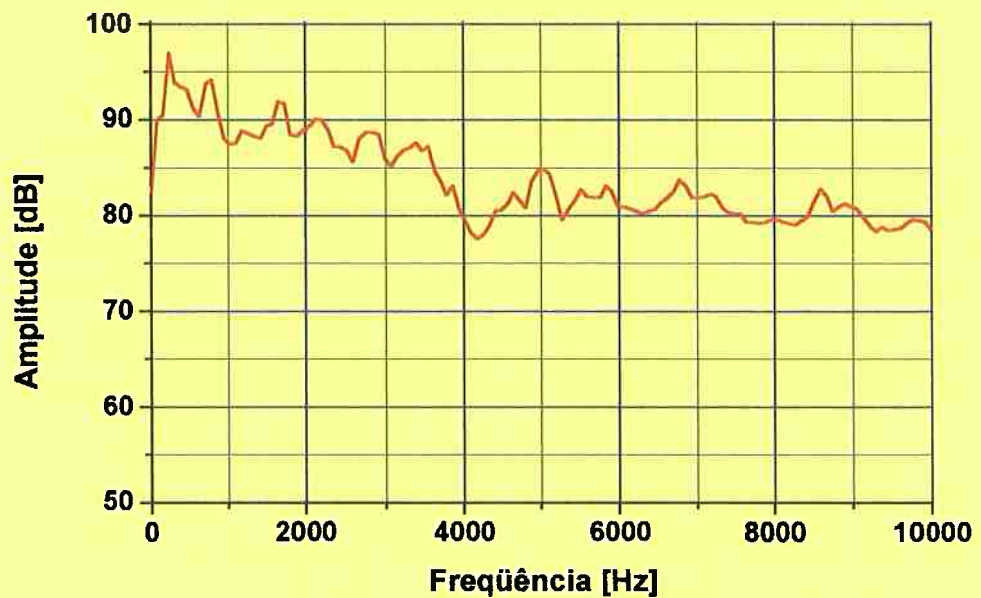


Figura 160. Amplitude da resposta, no domínio da freqüência, do Decibelímetro Minipa MSL-1352, na medida M4 (entrada de 2,0 Volts)

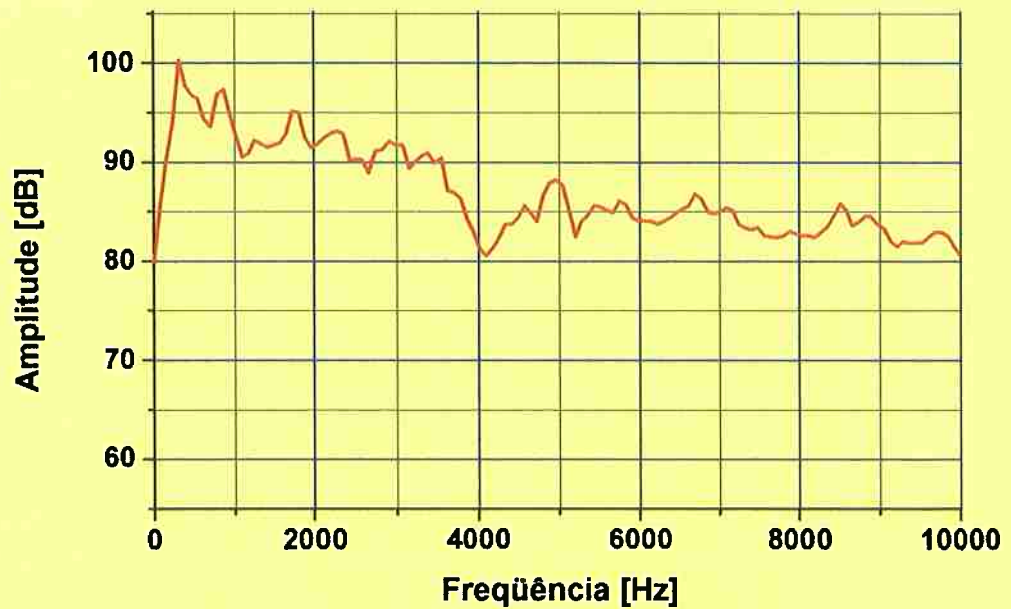


Figura 161. Amplitude da resposta, no domínio da frequência, do Decibelímetro Minipa MSL-1352, na medida M5 (entrada de 3,0 Volts)

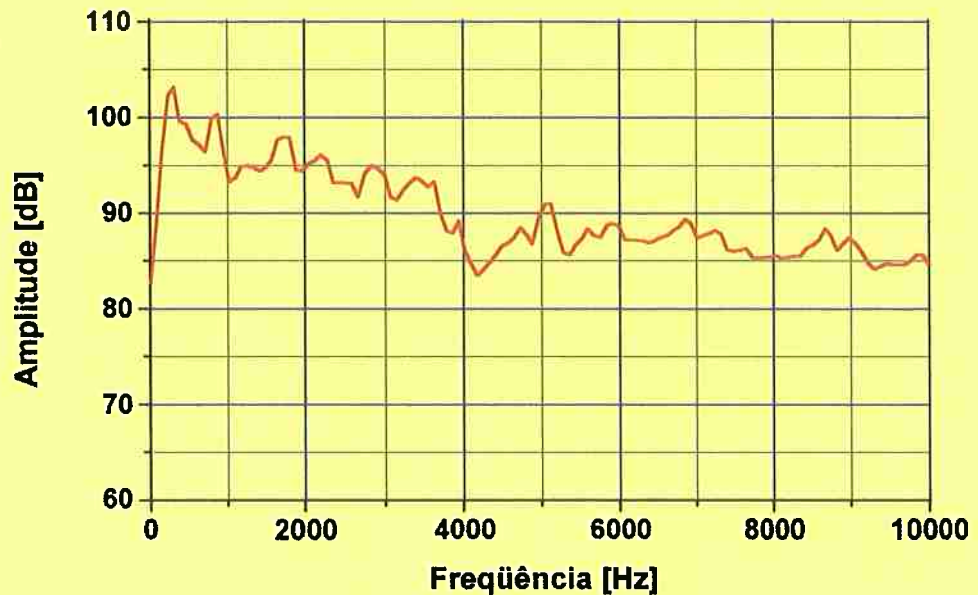


Figura 162. Amplitude da resposta, no domínio da frequência, do Decibelímetro Minipa MSL-1352, na medida M6 (entrada de 4,0 Volts)

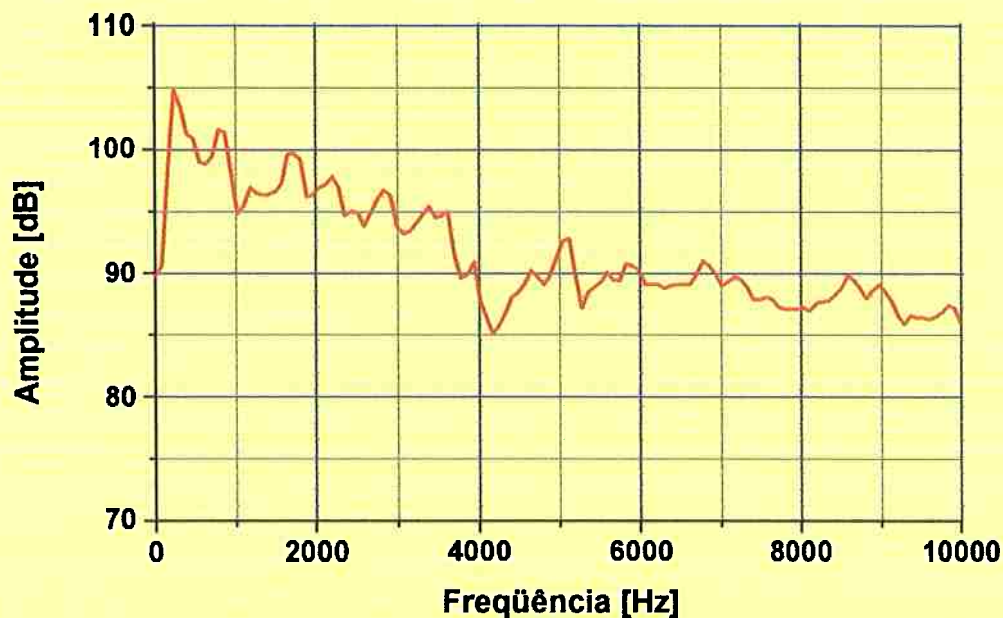


Figura 163. Amplitude da resposta, no domínio da frequência, do Decibelímetro Minipa MSL-1352, na medida M7 (entrada de 5,0 Volts), rampa do sinal de entrada discretizada em 128 pontos

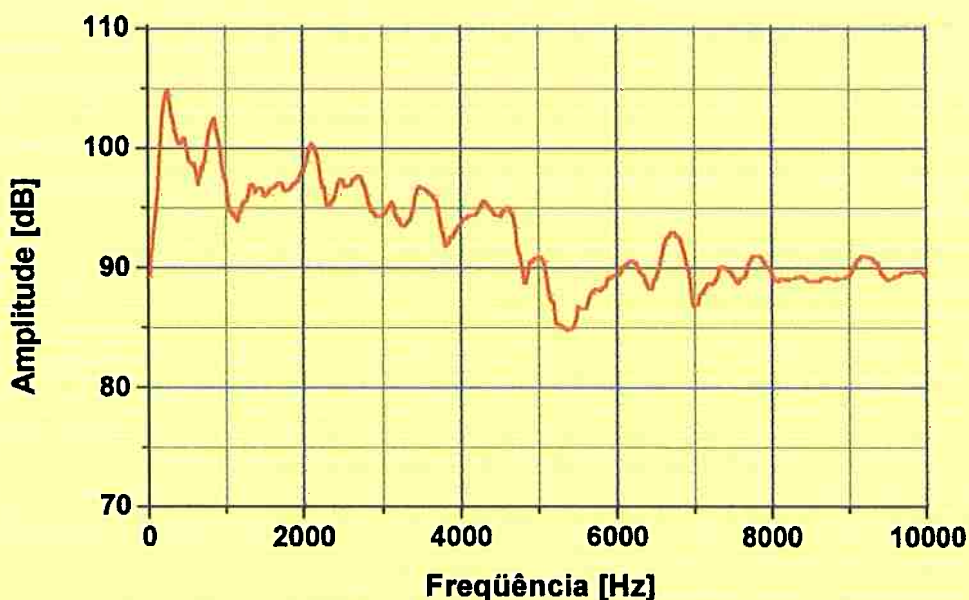


Figura 164. Amplitude da resposta, no domínio da frequência, do Decibelímetro Minipa MSL-1352, na medida M8 (entrada de 5,0 Volts), rampa do sinal de entrada discretizada em 1024 pontos

C.5. Avaliação do erro experimental de medida do nível de pressão sonora (NPS)

A importância do processo de aferição executado pode ser visualmente apreendida a partir da visualização da Figura 165. No eixo das abscissas, estão postos os níveis de tensão elétrica [V] condicionantes do sinal sonoro de entrada. Na ordenada, tem-se um gráfico do tipo “*Box-and-Plot*” que distribui, em quartis, a resposta do Nível de Pressão Sonora, NPS [dB].

Uma análise estatística utilizando o software *Statgraphics*® revela que:

- para uma dada tensão elétrica do sinal de entrada, a distribuição das respostas em dB, discretizadas em 128 ou 1024 bandas na faixa de 0 a 10 kHz, não se ajusta a uma distribuição normal;
- ao nível de significância de 95%, há diferença estatística significativa entre as oito amostras, M1 a M8; c) particularmente entre as amostras M7 e M8, ambas com um sinal de entrada de 5,0 V, mas com a rampa de entrada discretizada, respectivamente, em 128 e 1024 pontos, o teste de Kolmogorov-Smirnov apresenta um valor $p = 0,0000$. Ao nível de significância de 95%, há diferença estatística entre as amostras.

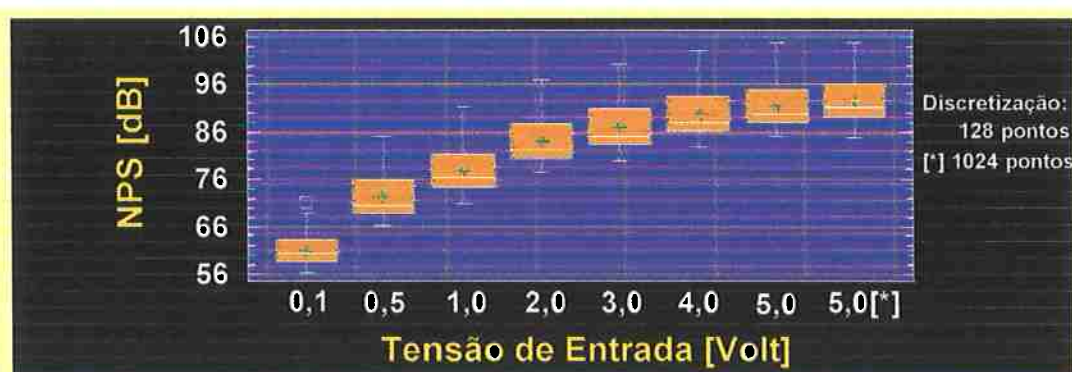


Figura 165. Distribuição, em quartis, dos valores [dB] da resposta em frequência do Decibelímetro Minipa MSL-1352, de acordo com a tensão elétrica [V] do sinal de entrada

A Figura 165 mostra que há uma variação máxima de 20 dB entre os valores máximo e mínimo do nível de pressão sonora, quando se varre a banda de frequência de 0 a 10 kHz, para uma mesma tensão elétrica do sinal sonoro de entrada.

Feitas estas considerações, pode-se inferir que o Decibelímetro utilizado para investigar o nível de pressão sonora no interior de uma câmara semi-aneecóica:

1. É bastante sensível às flutuações de pressão do ar ambiente correlacionada à faixa de tensão elétrica de 0,1 a 5,0 Volts, ou seja, para NPS de 56 a 106 dB;
2. As flutuações no valor de NPS são maiores às frequências compreendidas entre 0 e 5 kHz, com variação máxima de 21 dB, sendo este valor de 8 dB na banda de frequência de 5 a 10 kHz;

Assim, uma janela com 128 medidas de NPS [dB] efetuadas no domínio do tempo a uma taxa de aquisição de 1 Hz, caracterizar-se-á por uma avaliação RMS do sinal de pressão sonora com um erro máximo de 8 dB no intervalo interquartil de 25 a 75%. Para um sinal com amplitude de 100 dB, ter-se-á um erro máximo de 8%.

Anexo D

Resultados dos ensaios disco-disco

"...¿sería justo que te vieses en deseo de tomar aquel diamante y ponerle entre una yunque e un martillo, y allí, a pura fuerza de golpes e brazos, probar si es tan duro y tan fino como dicen? Y más, si lo pusieses por obra; que, puesto caso que la piedra hiciese resistencia a tan necia prueba, no por eso se le añadiría más valor ni más fama, y si rompiese, cosa que podría ser, ¿no se perdía todo?"

CERVANTES, Miguel de *op. cit.* p. 384.

Os resultados das variáveis medidas durante os ensaios são apresentados neste Anexo para os pares tribológicos ensaiados de aço AISI 52100 (primeiro corpo) e aço AISI 52100 (disco antagonista), aço AISI 52100 e aço AISI 1045 nitretado a plasma, aço AISI 52100 e ferro fundido nodular austemperado e nitretado (ADI), ADI e ADI nitretados, ADI e ADI sem nitretação, cobre eletrolítico e aço AISI 52100, aço AISI M2 e aço AISI 52100, aço AISI M2 e ADI, aço AISI M2 e aço AISI M2.

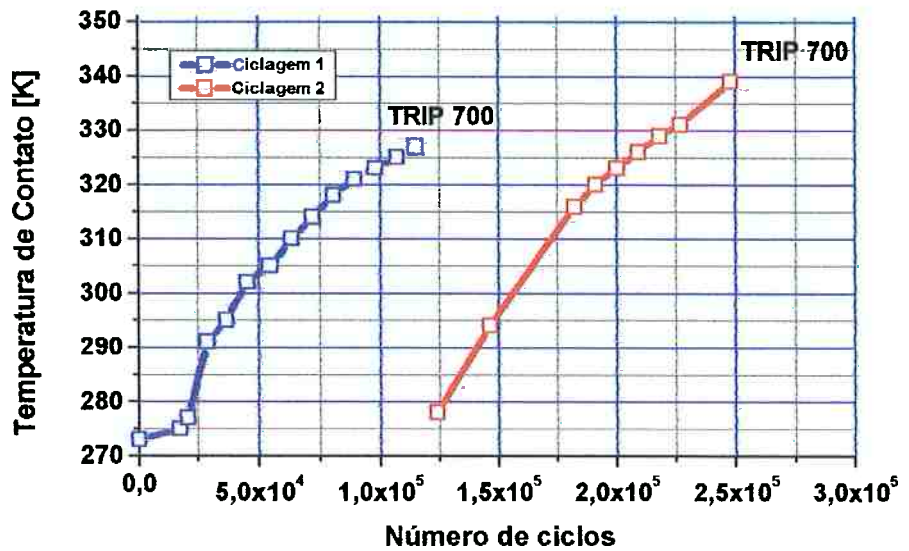
Os ensaios começaram a ser executados em discos de aço AISI 1045 e aço AISI 1045, em que se tomou contato com a máquina de ensaio e se observou o processo, sem a preocupação de anotar ou registrar quaisquer dados.

Importava, naquela fase embrionária, a percepção do fenômeno físico da fadiga de contato, em que trincas subsuperficiais ou superficiais são nucleadas no material, a visualização do desprendimento de partículas ("*debris*"), do comportamento dinâmico da máquina como detectado, para várias combinações de carga e velocidade, pela percepção tátil da ponta dos dedos e auditiva do mecânico.

Cálculos Hertzianos à mão, bibliografia na outra, ausência de informações no país sobre esse tipo de investigação, esse foi o panorama inicial que contribuiu para as decisões relativas ao planejamento do experimento.

A seguir, os resultados obtidos nos experimentos dos ensaios disco-disco.

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO M2-31



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO M2-31

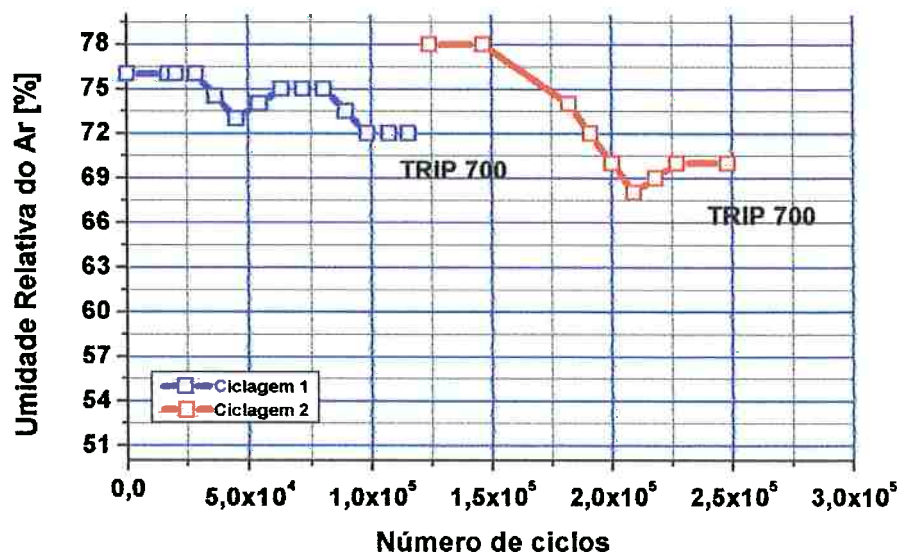
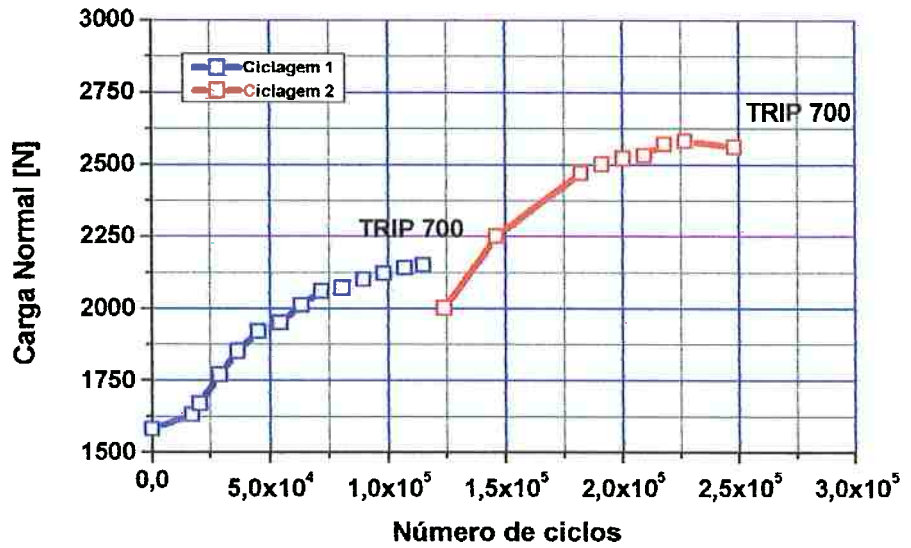


Figura 166. Evolução da umidade da sala e temperatura de contato durante o ensaio do par de discos de aço AISI M2-31MR e aço AISI 52100 ER83mvOQT (temperado, resfriado em óleo e revenido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO M2-31



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO M2-31

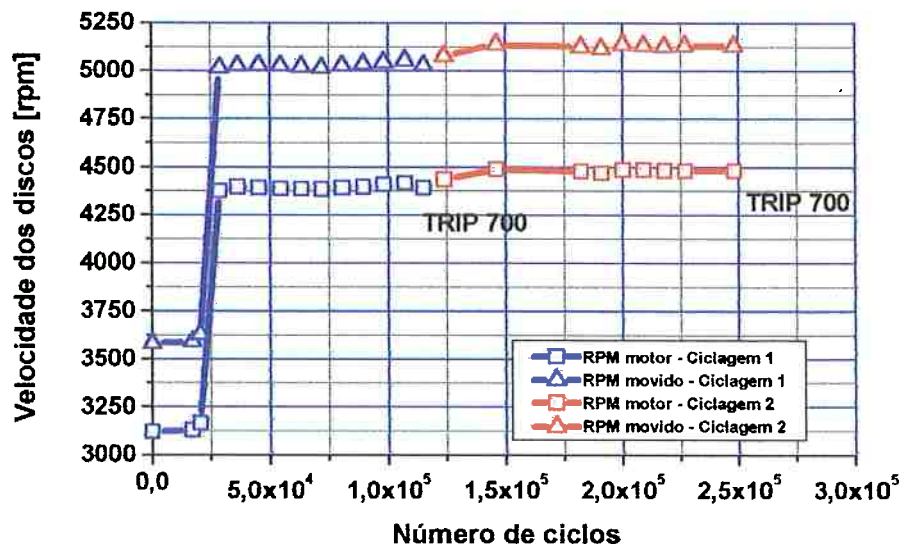
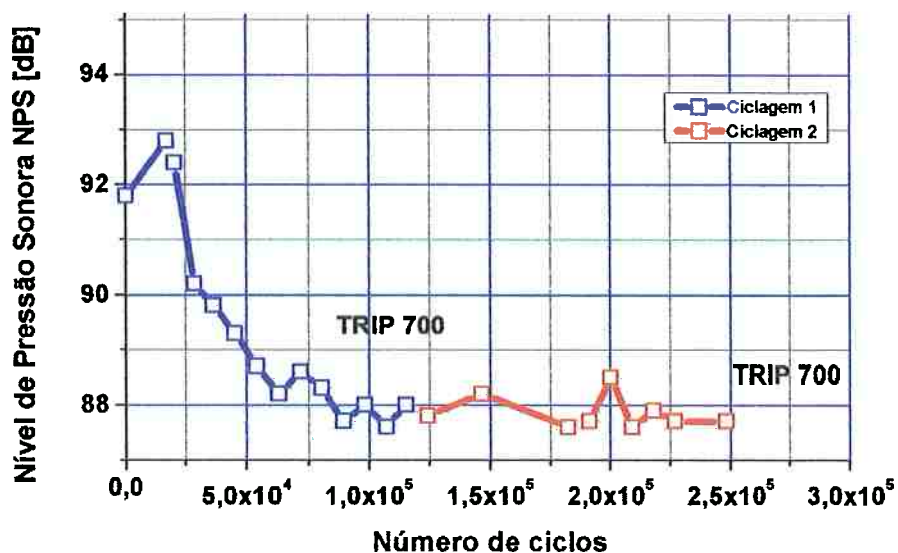


Figura 167. Evolução da carga normal de contato e velocidade durante o ensaio do par de discos de aço AISI M2-31MR e aço AISI 52100 ER83mvOQT (temperado, resfriado em óleo e revenido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO M2-31



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO M2-31

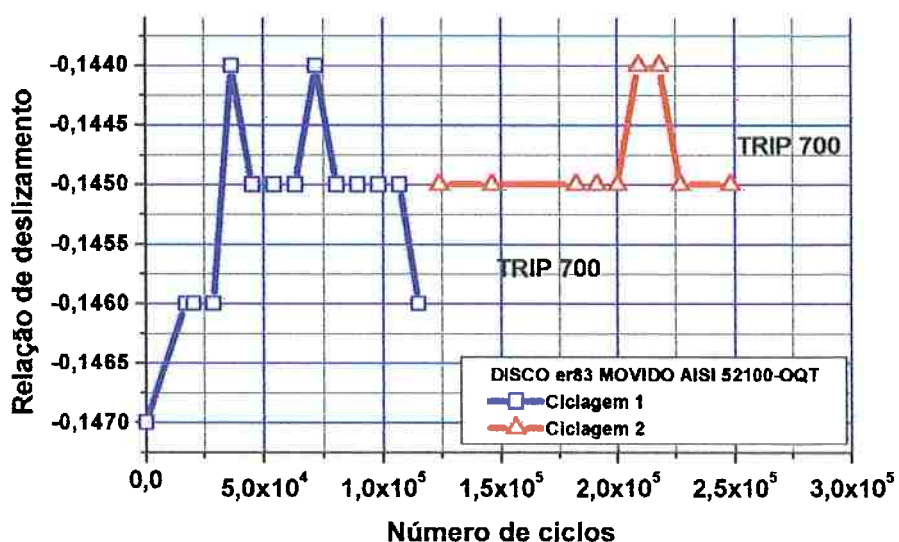
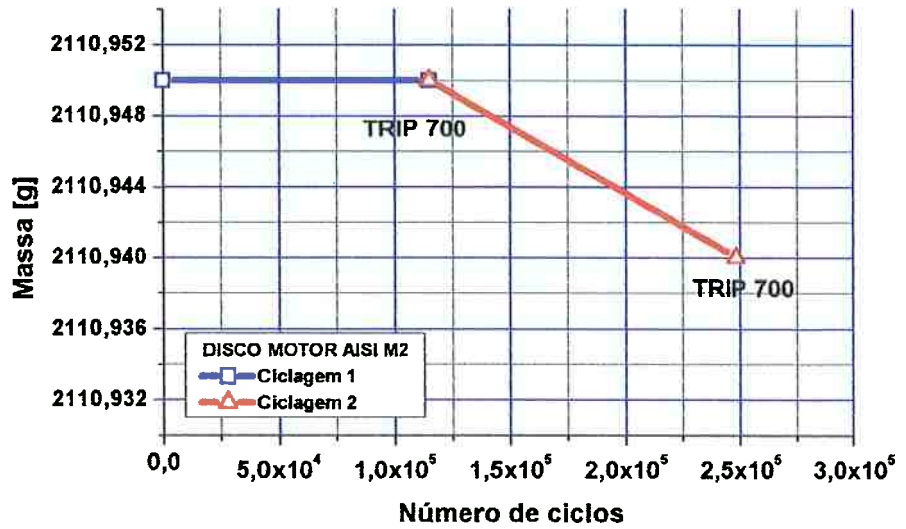


Figura 168. Evolução do Nível de Pressão Sonora e relação de deslizamento durante o ensaio do par de discos de aço AISI M2-31MR e aço AISI 52100 ER83mvOQT (temperado, resfriado em óleo e revenido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO M2-31



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO M2-31

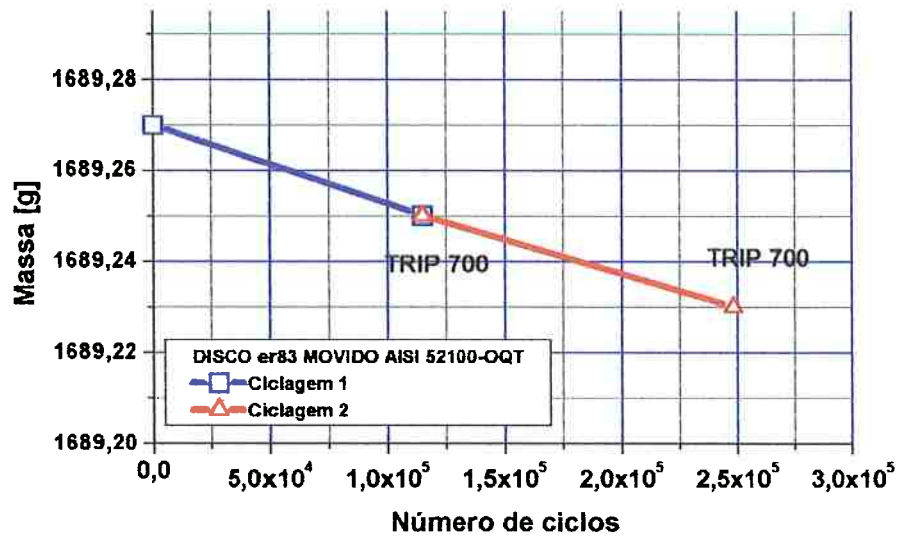
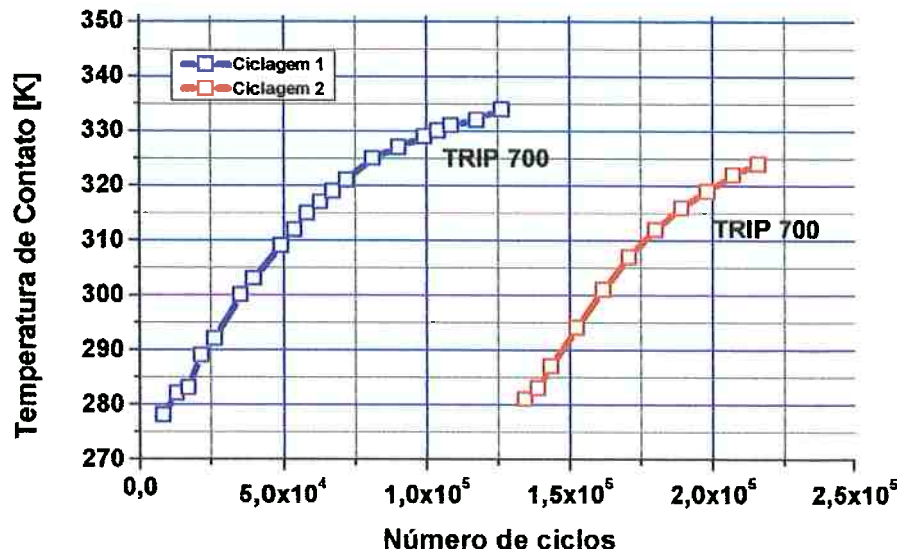


Figura 169. Evolução da perda massa dos discos motor e movido durante o ensaio do par de discos de aço AISI M2-31MR e aço AISI 52100 ER83mvOQT (temperado, resfriado em óleo e revenido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO M2-32



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO M2-32

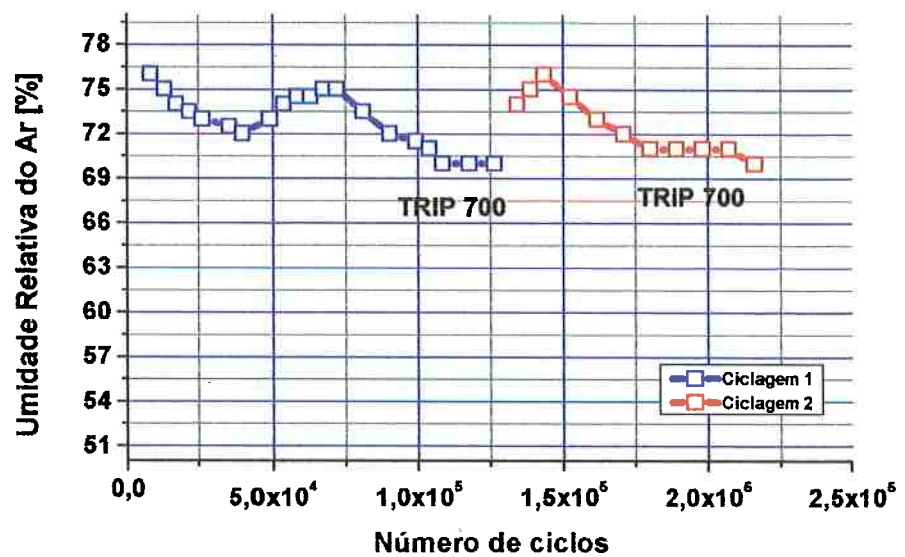
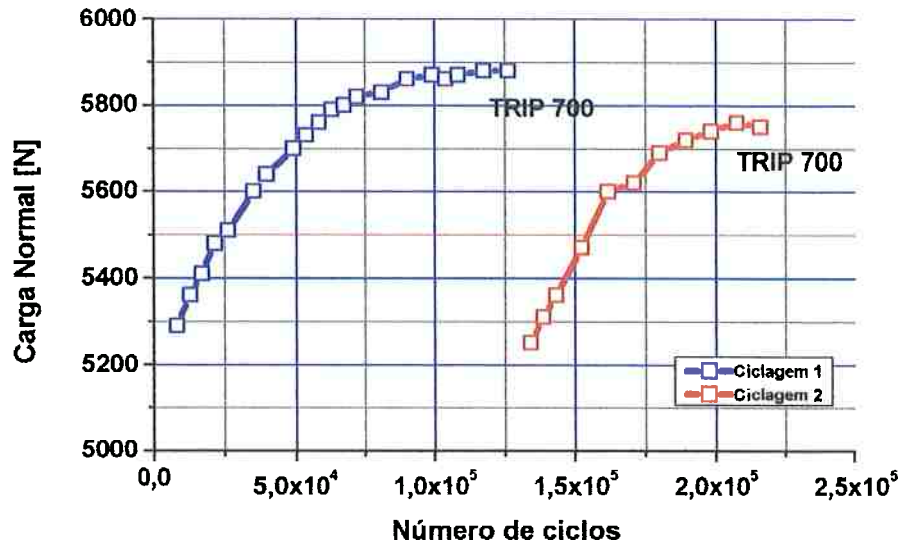


Figura 170. Evolução da umidade da sala e temperatura de contato durante o ensaio do par de discos de aço AISI M2-32MR e aço AISI 52100 ER83mrvOQT (temperado, resfriado em óleo e revenido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO M2-32



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO M2-32

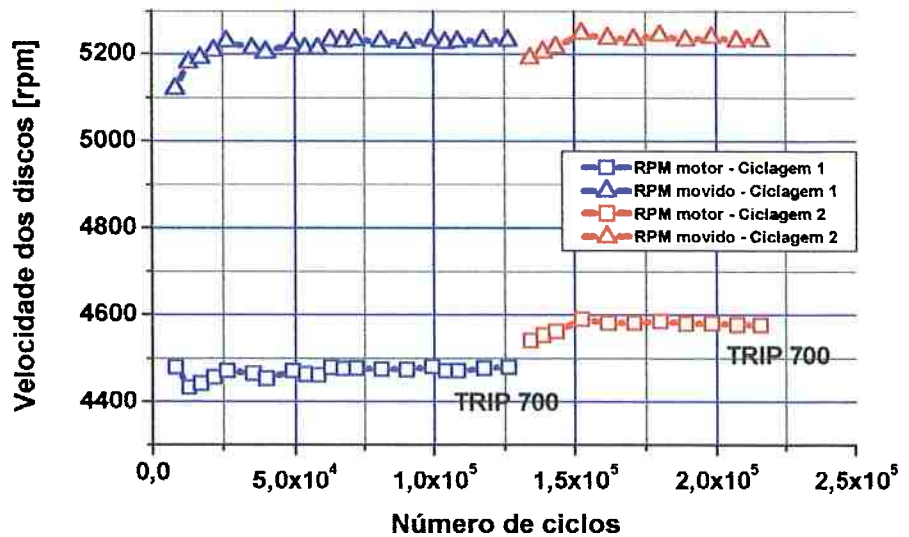
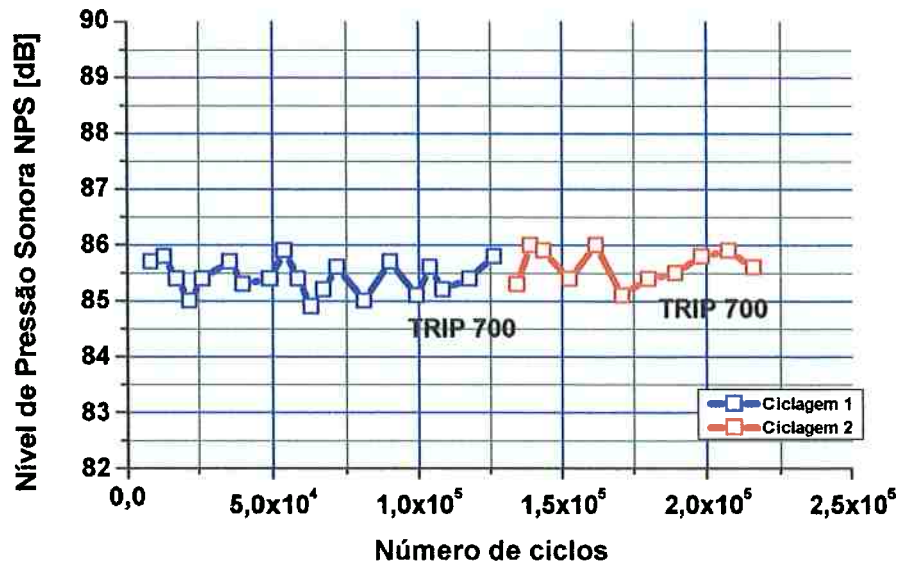


Figura 171. Evolução da carga normal de contato e velocidade durante o ensaio do par de discos de aço AISI M2-32MR e aço AISI 52100 ER83mrvOQT (temperado, resfriado em óleo e revenido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO M2-32



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO M2-32

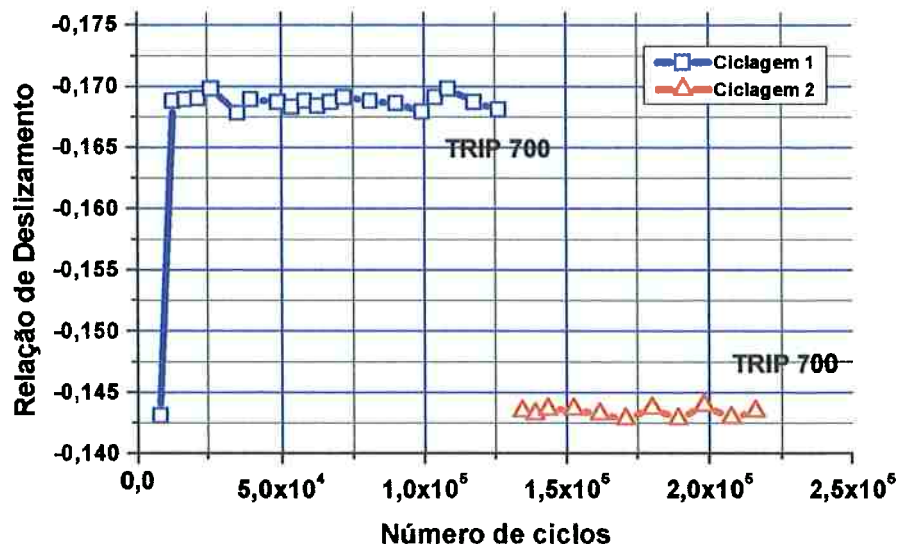
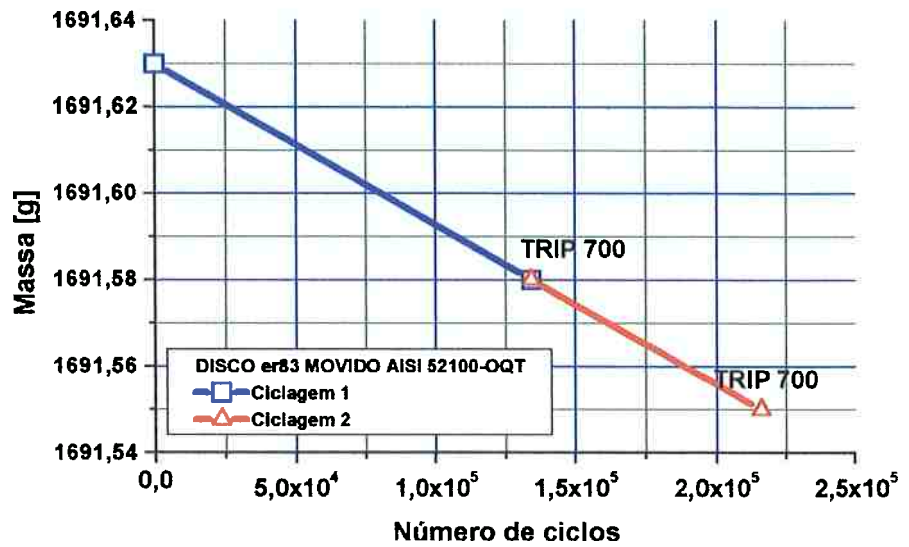


Figura 172. Evolução do Nível de Pressão Sonora e relação de deslizamento durante o ensaio do par de discos de aço AISI M2-32MR e aço AISI 52100 ER83mrvOQT (temperado, resfriado em óleo e revenido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO M2-32



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO M2-32

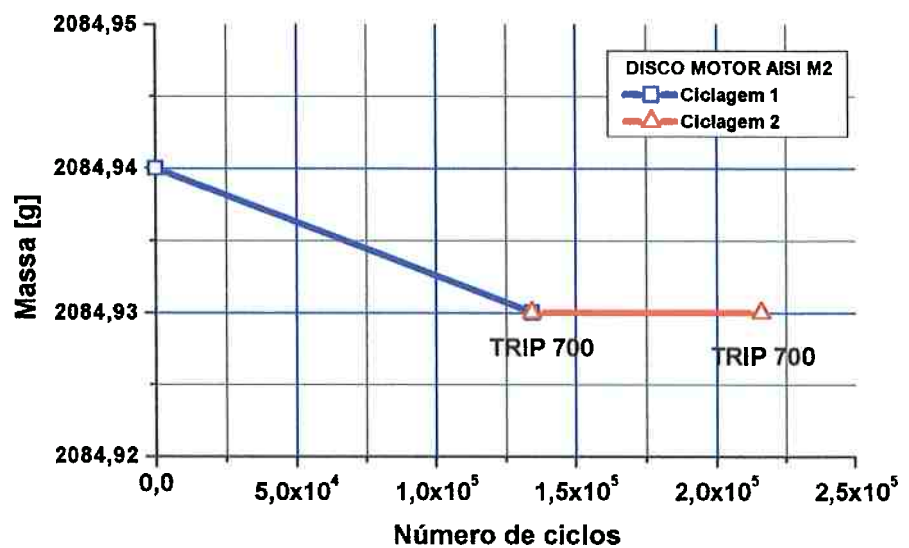
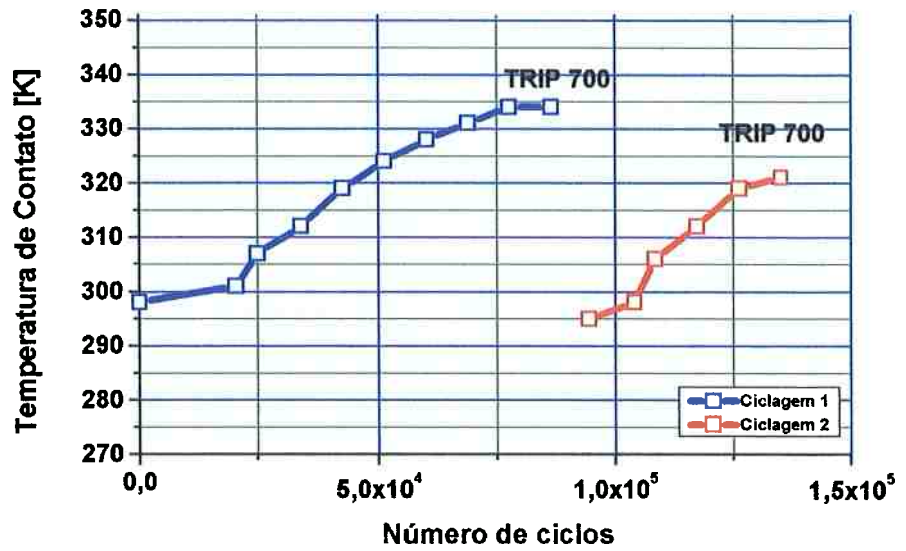


Figura 173. Evolução da perda massa dos discos motor e movido durante o ensaio do par de discos de aço AISI M2-32MR e aço AISI 52100 ER83mrvOQT (temperado, resfriado em óleo e revenido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO M2-33



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO M2-33

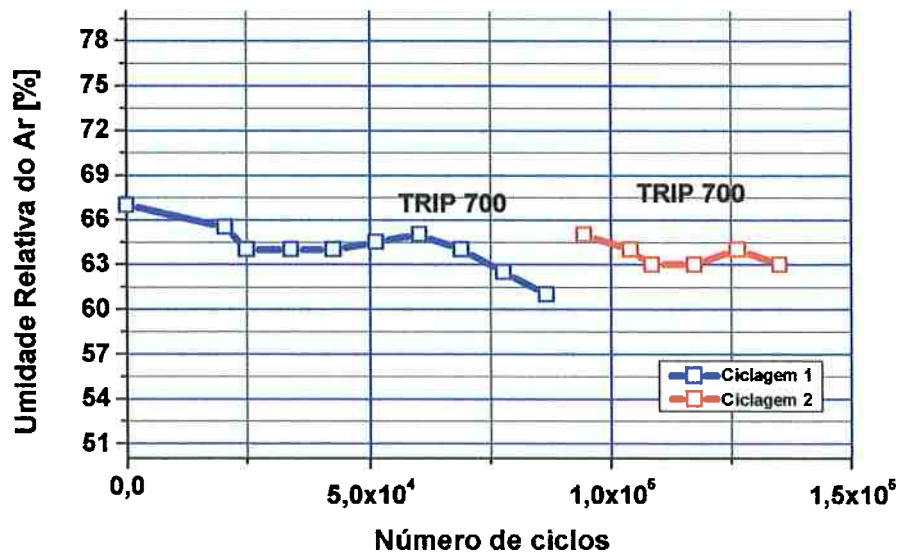
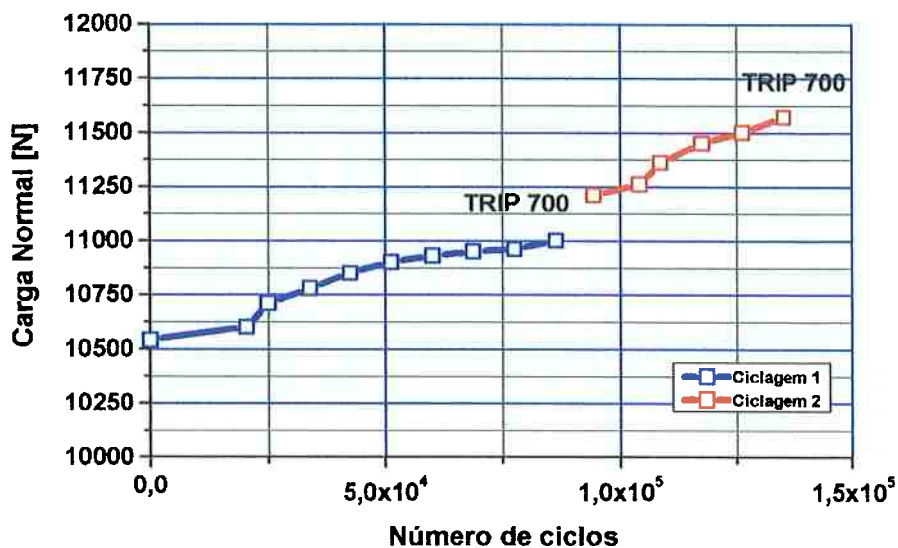


Figura 174. Evolução da umidade da sala e temperatura de contato durante o ensaio do par de discos de aço AISI M2-33MR e aço AISI 52100 ER84mrvOQT (temperado, resfriado em óleo e revenido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO M2-33



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO M2-33

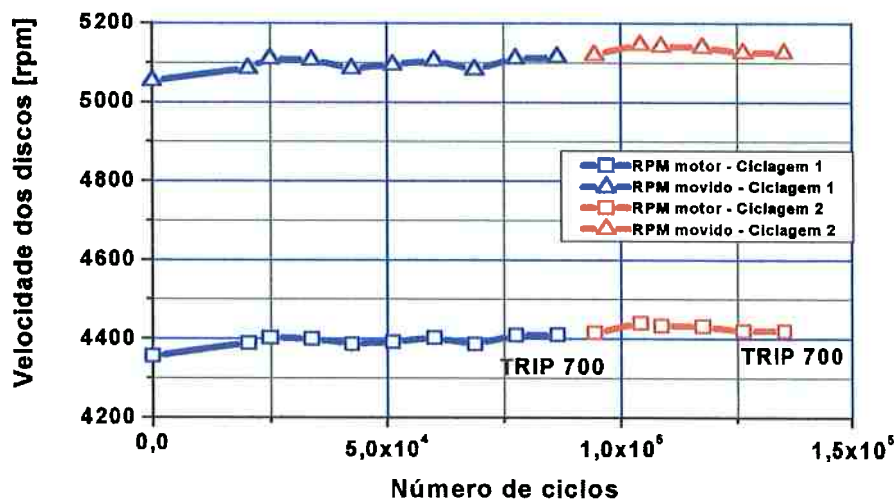
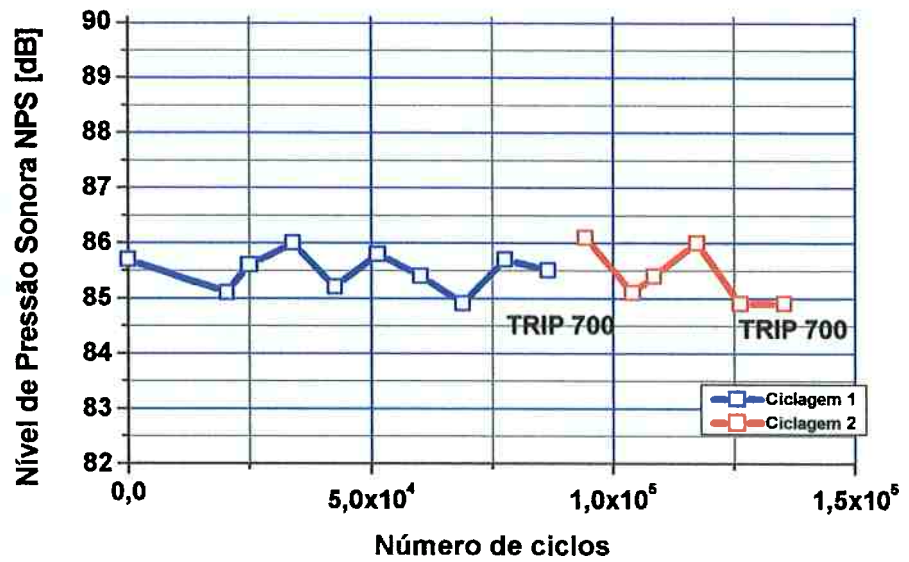


Figura 175. Evolução da carga normal de contato e velocidade durante o ensaio do par de discos de aço AISI M2-33MR e aço AISI 52100 ER84mrvOQT (temperado, resfriado em óleo e revenido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO M2-33



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO M2-33

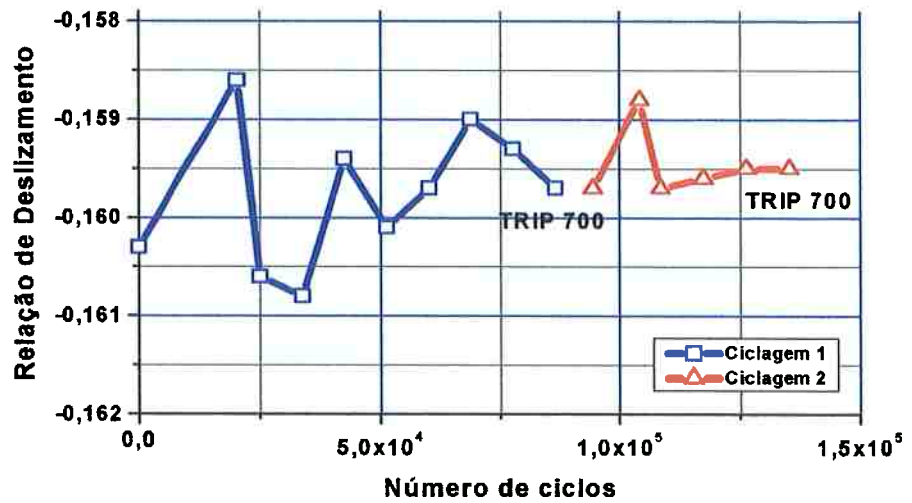


Figura 176. Evolução do Nível de Pressão Sonora e relação de deslizamento durante o ensaio do par de discos de aço AISI M2-33MR e aço AISI 52100 ER84mrvOQT (temperado, resfriado em óleo e revenido)



Figura 178. Visualização da largura das pistas de contato após os ensaios de rolamento M2-31, M2-32 e M2-33 entre os pares de discos (espessura 8,2 mm) de aço AISI M2 (diâmetro maior) e AISI 52100

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO M2-39



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO M2-39

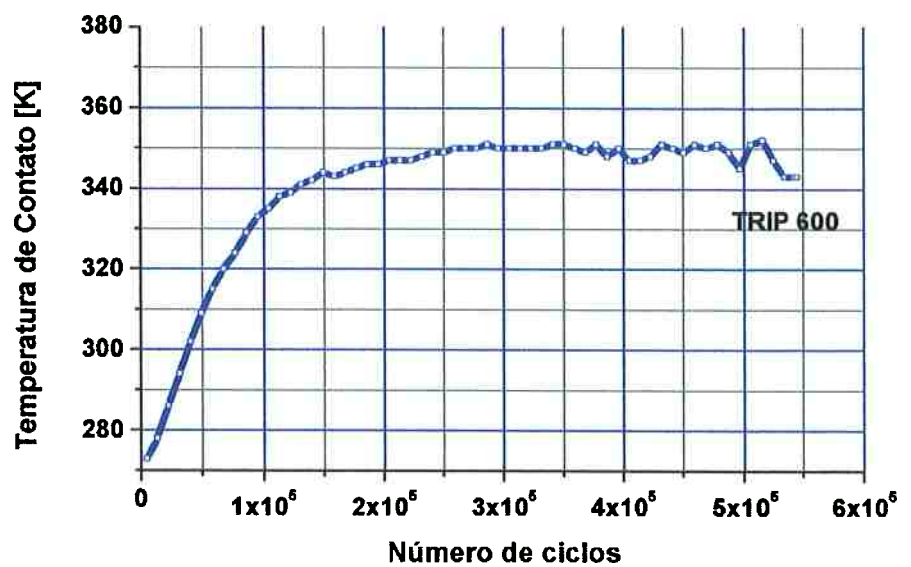
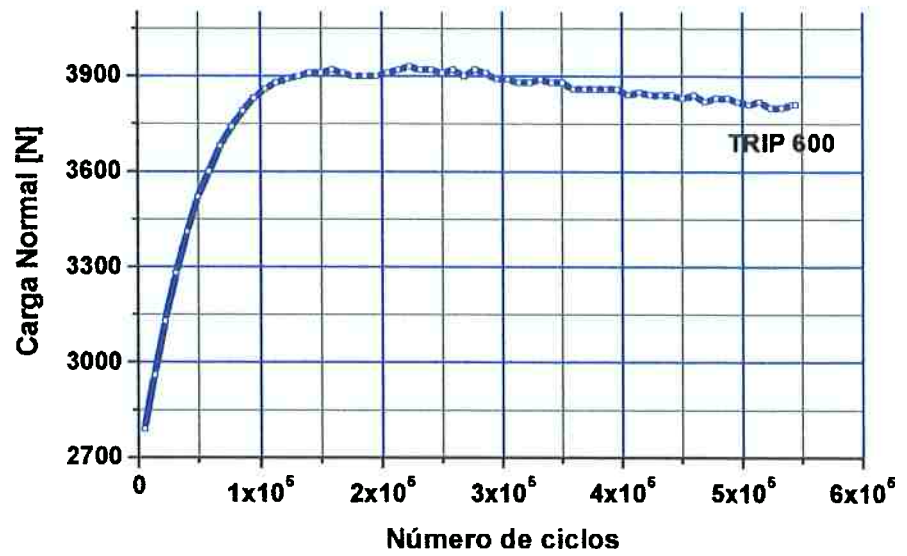


Figura 179. Evolução da umidade da sala e temperatura de contato durante o ensaio do par de discos M239MR e ER84mVOQT

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO M2-39



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO M2-39

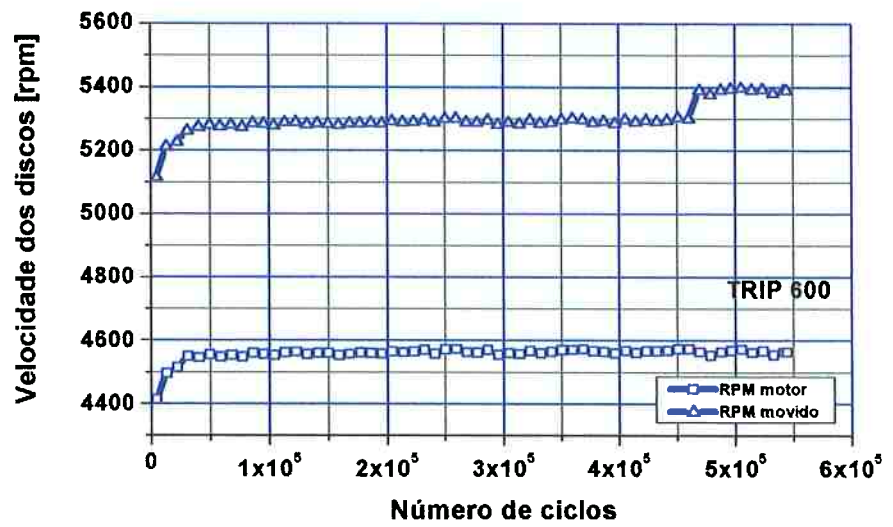
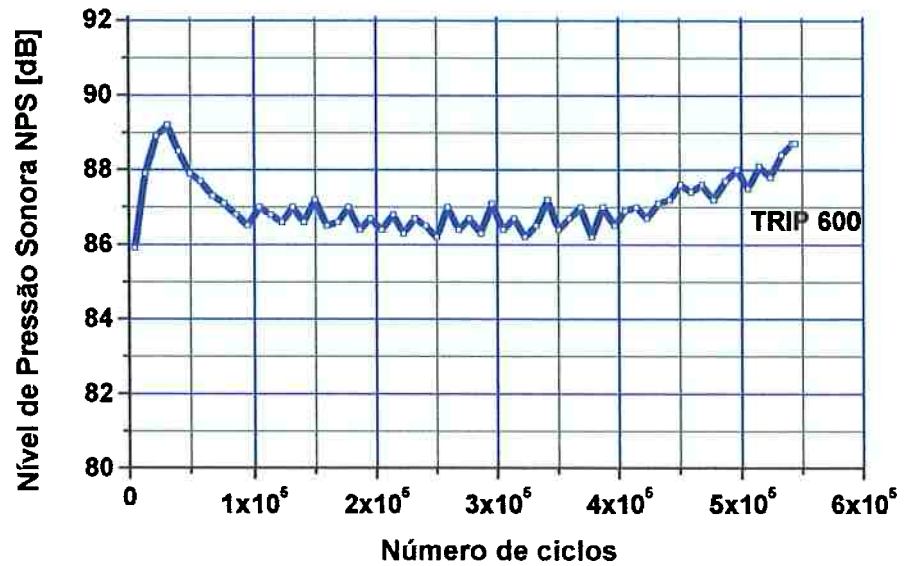


Figura 180. Evolução da carga normal de contato e velocidade durante o ensaio do par de discos M239MR e ER84mVOQT

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO M2-39



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO M2-39

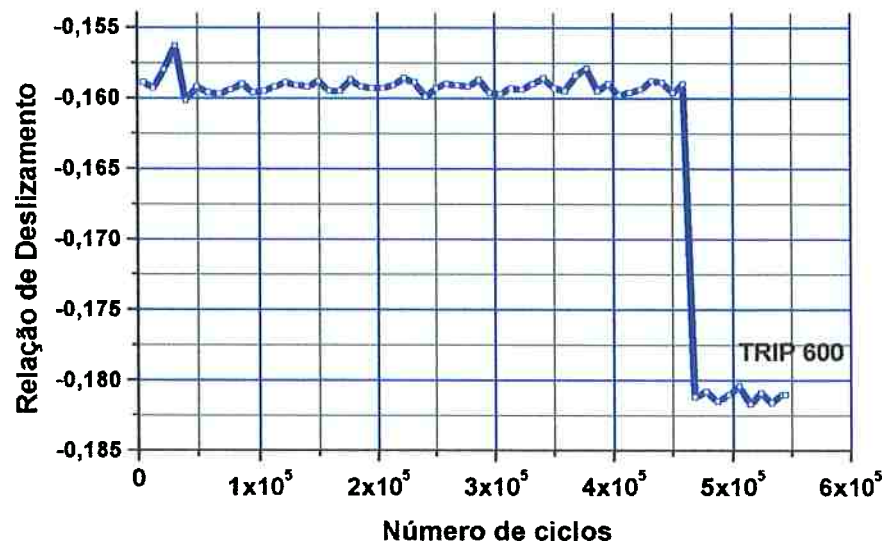
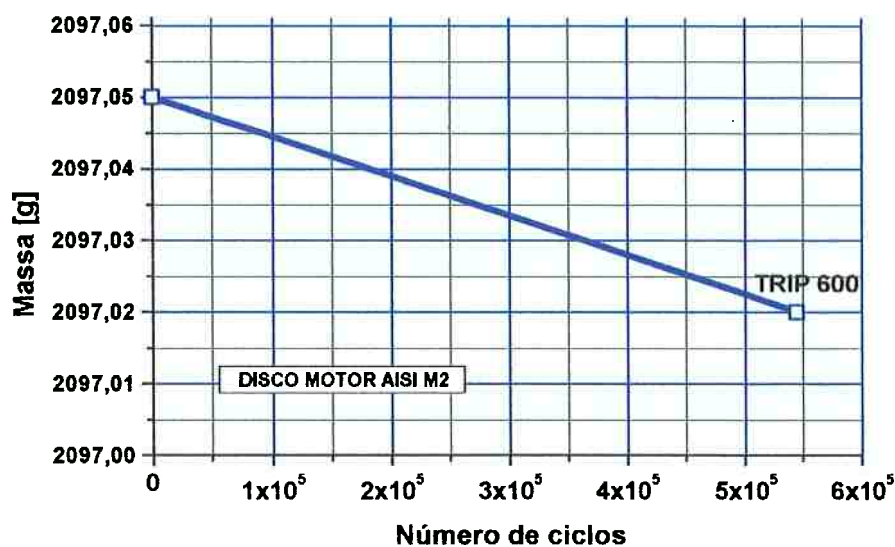


Figura 181. Evolução do Nível de Pressão Sonora e relação de deslizamento durante o ensaio do par de discos M239MR e ER84mvOQT

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO M2-39



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO M2-39

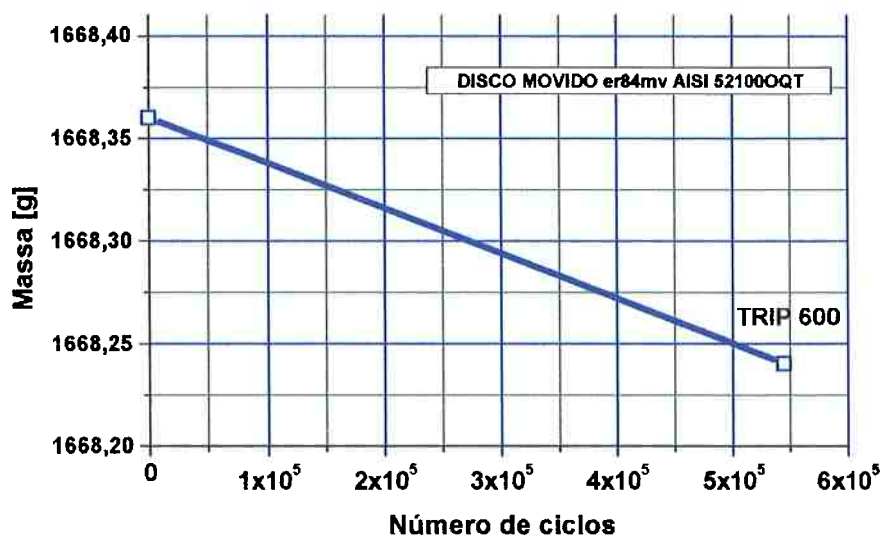
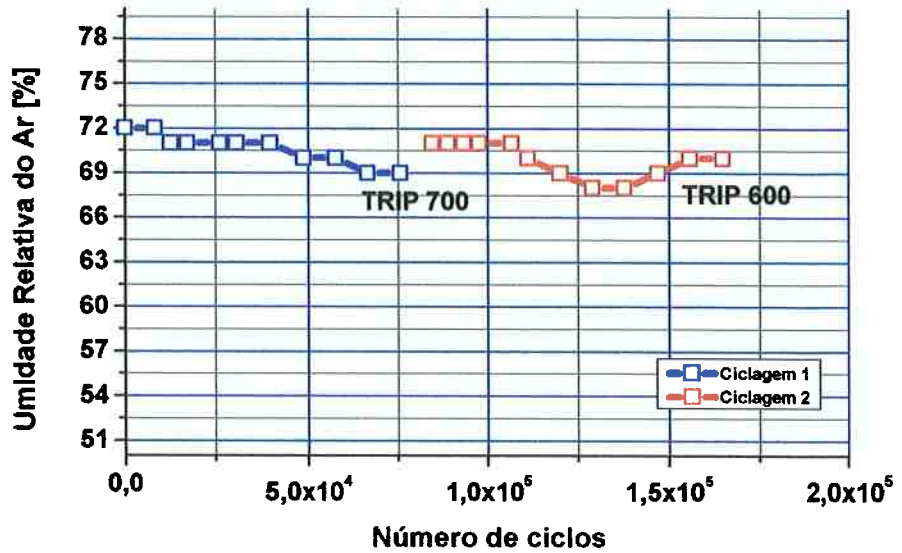


Figura 182. Evolução da perda massa dos discos motor e movido durante o ensaio do par de discos M239MR e ER84mvOQT

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO M2-34



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO M2-34

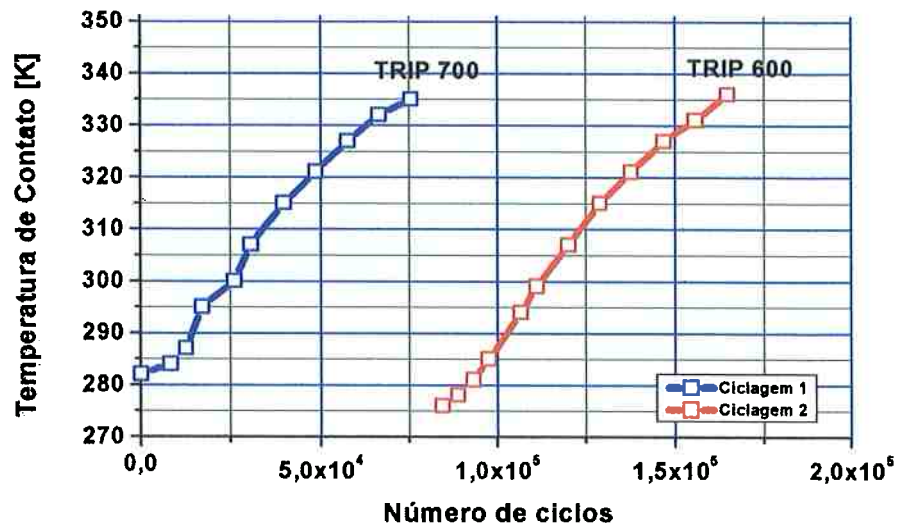
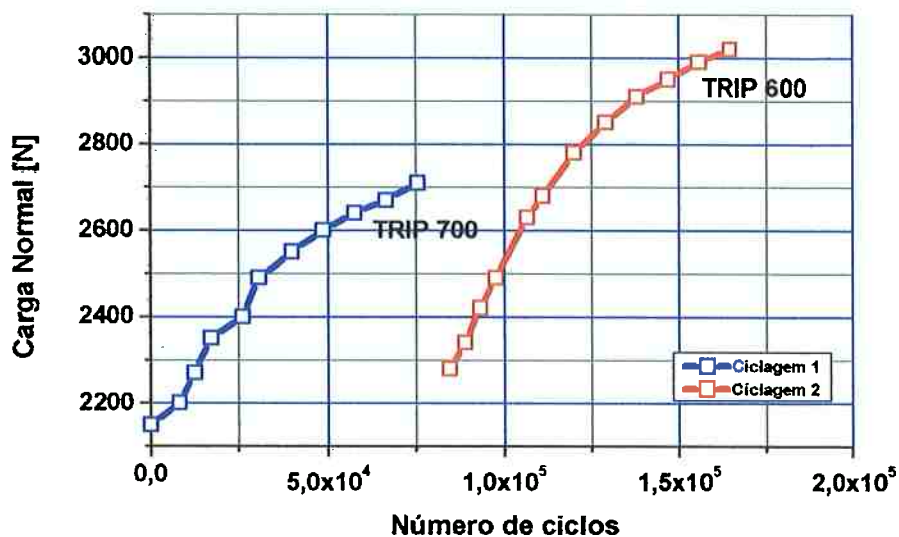


Figura 183. Evolução da umidade da sala e temperatura de contato durante o ensaio do par de discos M234MR e ADI201mv

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO M2-34



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO M2-34

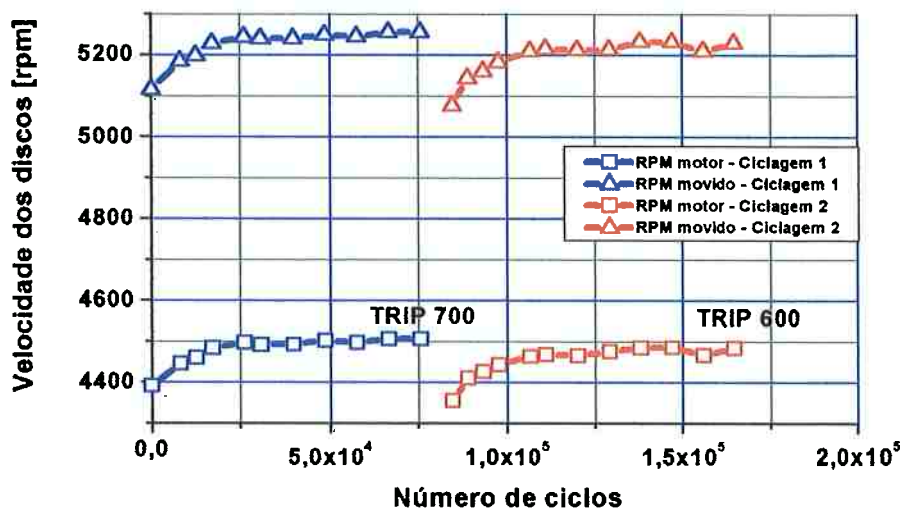
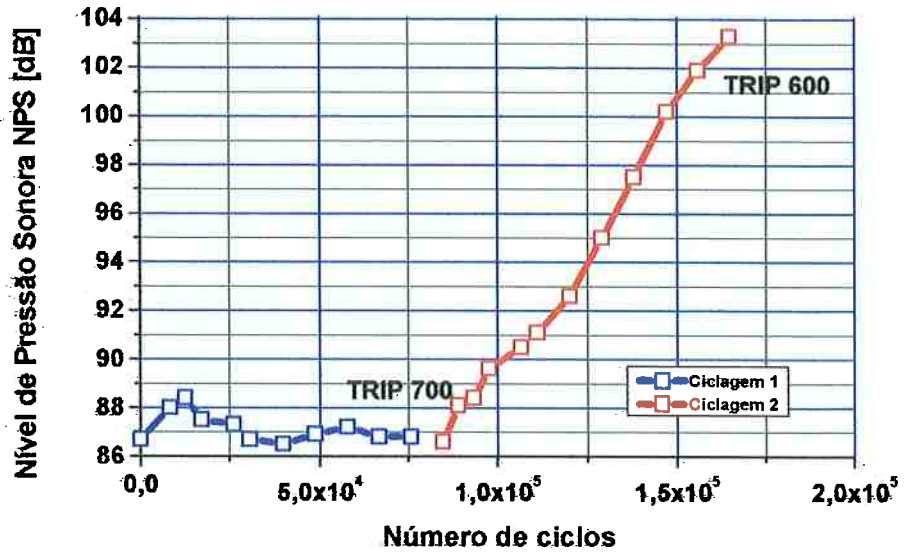


Figura 184. Evolução da carga normal de contato e velocidade durante o ensaio do par de discos M234MR e ADI201mv

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO M2-34



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO M2-34

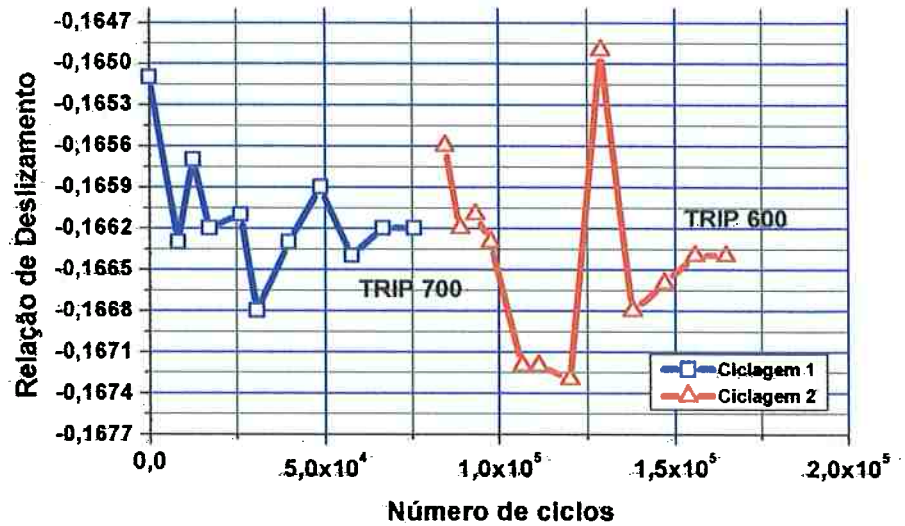
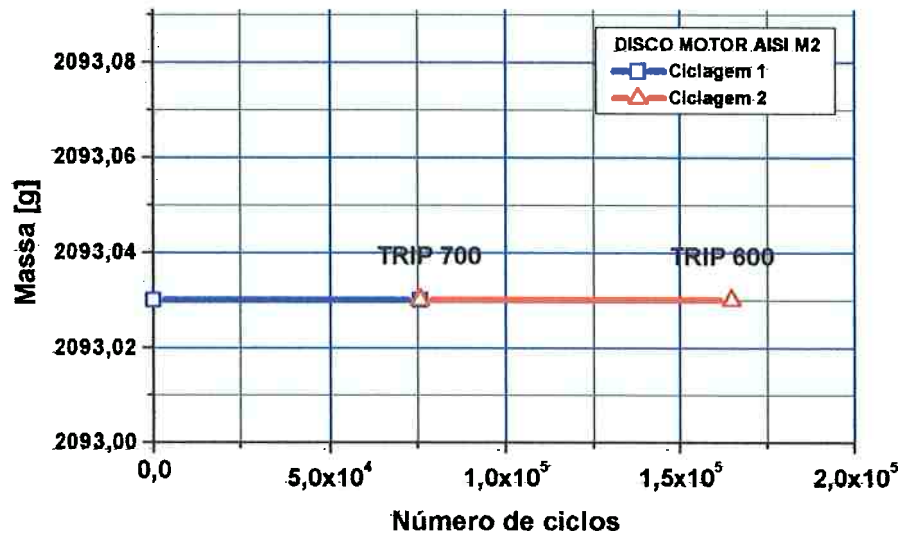


Figura 185. Evolução do Nível de Pressão Sonora e relação de deslizamento durante o ensaio do par de discos M234MR e ADI201mv

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO M2-34



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO M2-34

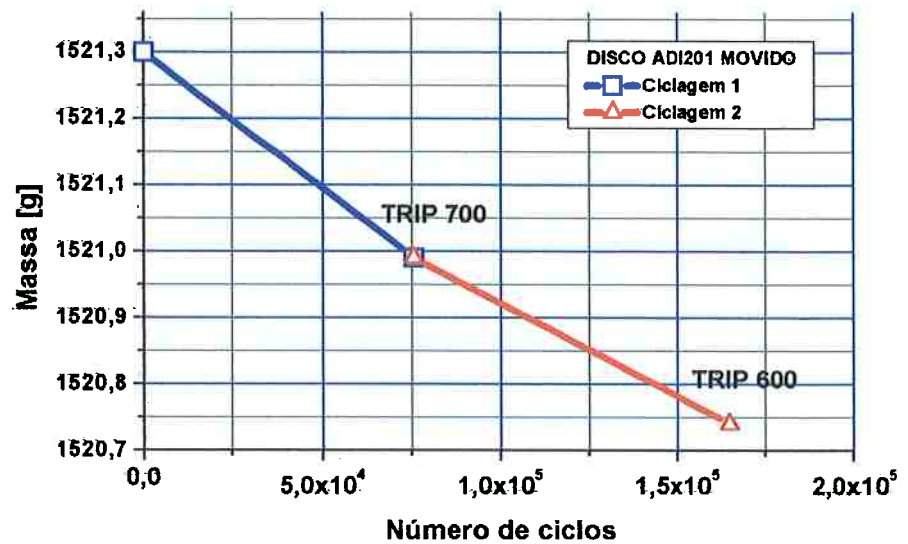
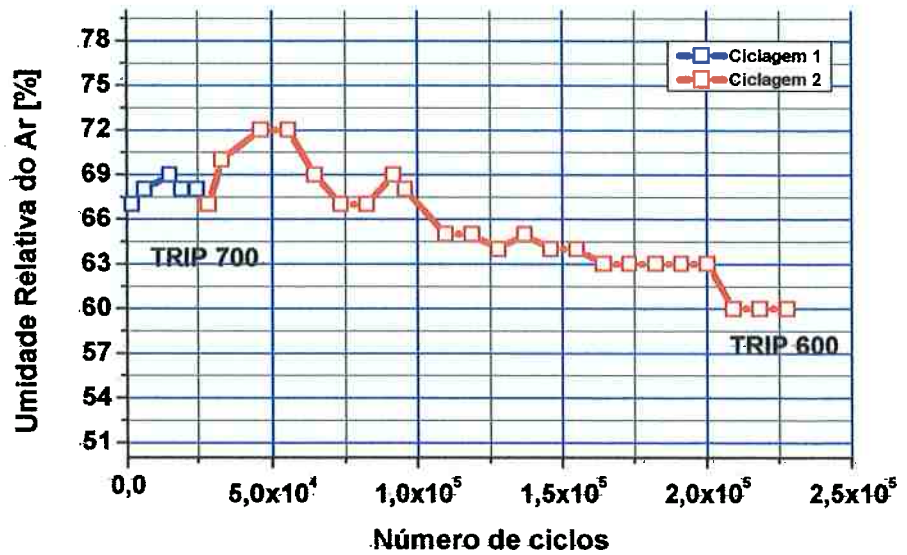


Figura 186. Evolução da perda massa dos discos motor e movido durante o ensaio do par de discos M234MR e ADI201mv

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO M2-35



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO M2-35

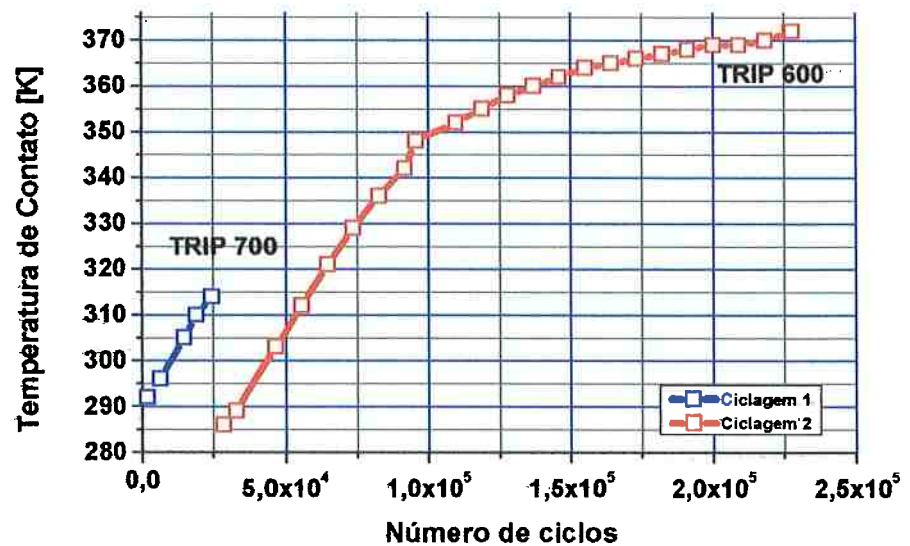
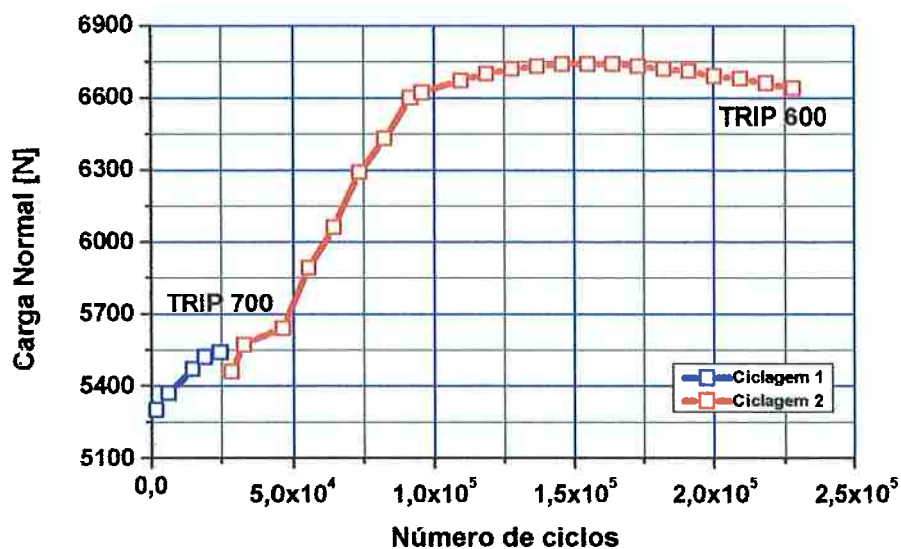


Figura 187. Evolução da umidade da sala e temperatura de contato durante o ensaio do par de discos M235MR e ADI202mv

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO M2-35



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO M2-35

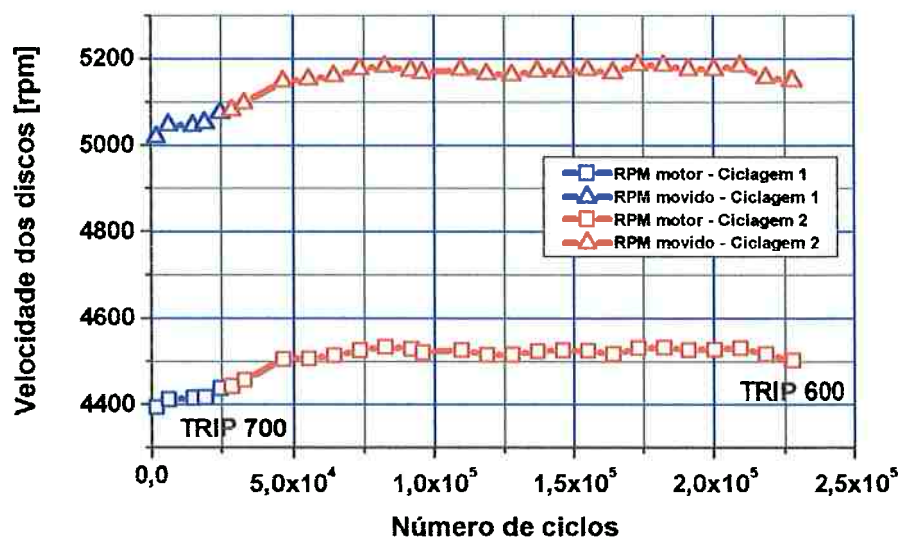
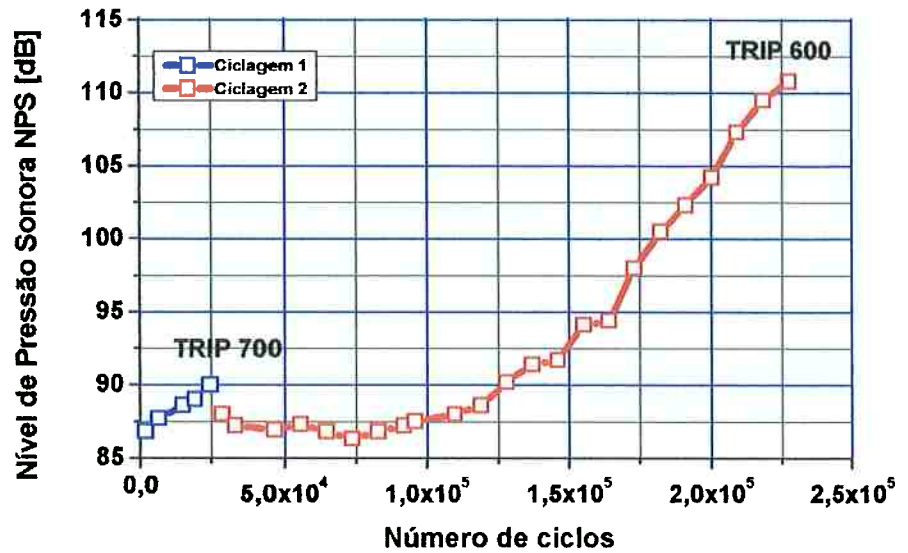


Figura 188. Evolução da carga normal de contato e velocidade durante o ensaio do par de discos M235MR e ADI202mv

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO M2-35



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO M2-35

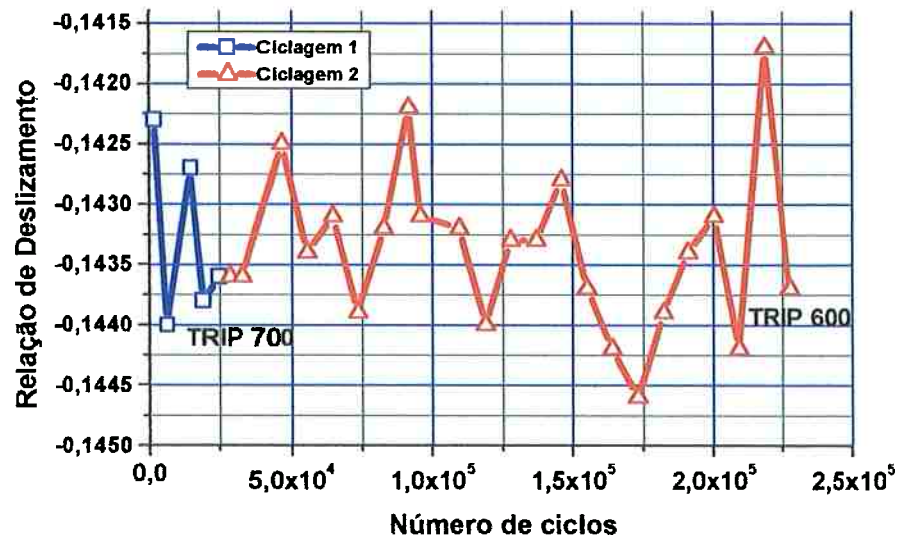
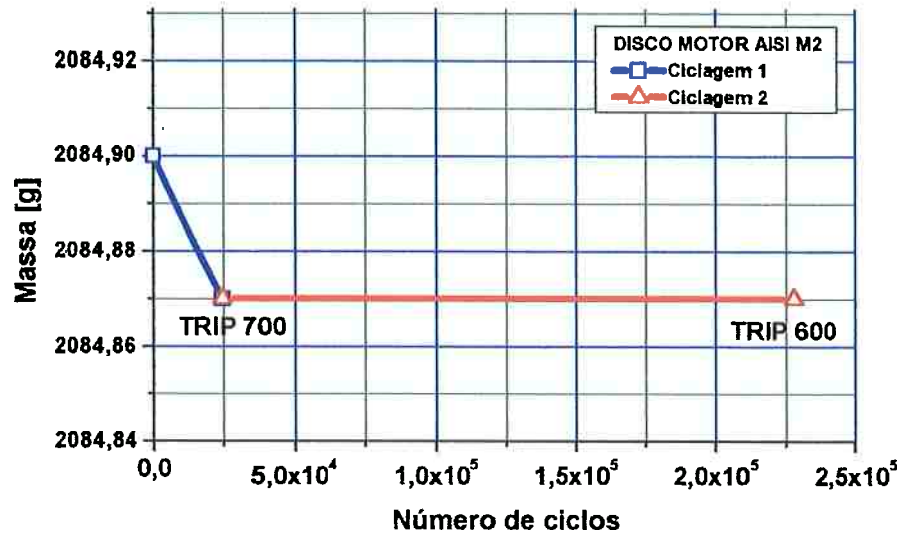


Figura 189. Evolução do Nível de Pressão Sonora e relação de deslizamento durante o ensaio do par de discos M235MR e ADI202mV

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO M2-35



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO M2-35

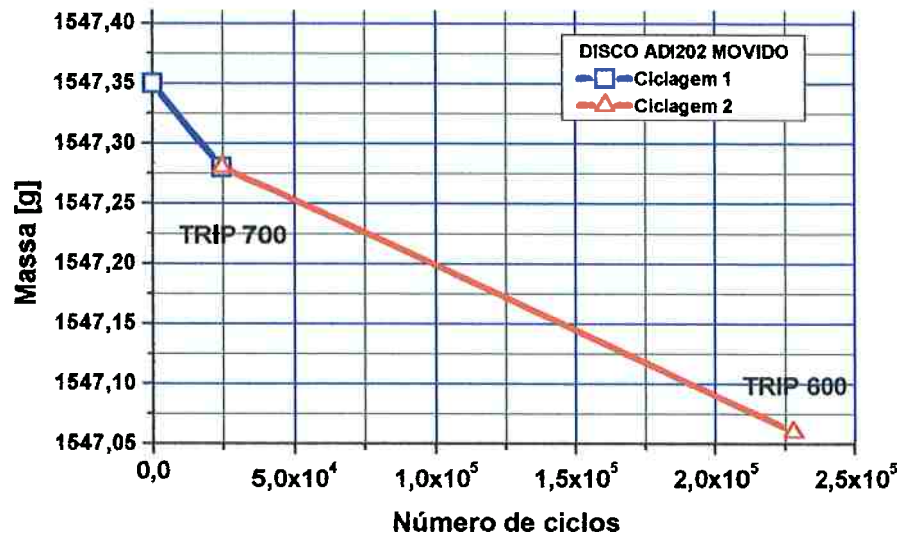
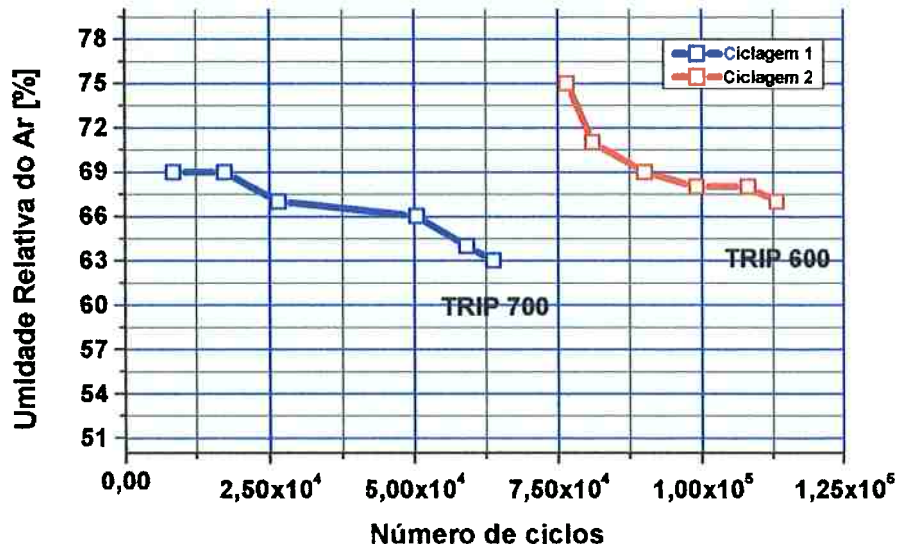


Figura 190. Evolução da perda massa dos discos motor e movido durante o ensaio do par de discos M235MR e ADI202mv

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO M2-36



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO M2-36

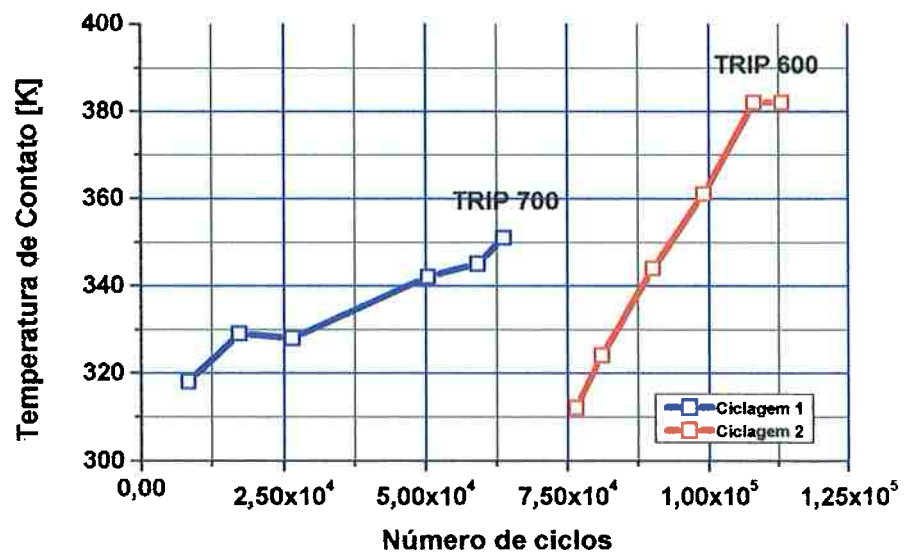
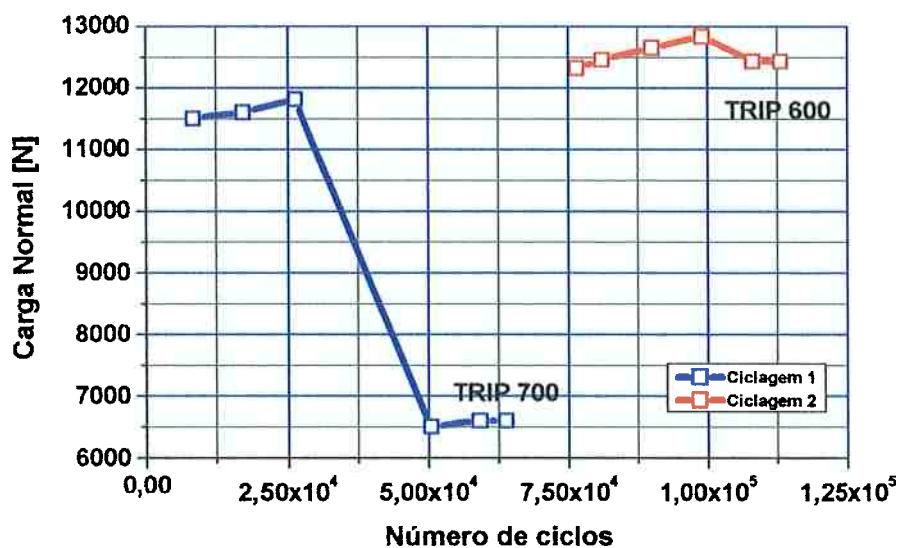


Figura 191. Evolução da umidade da sala e temperatura de contato durante o ensaio do par de discos M236MR e ADI203mv

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO M2-36



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO M2-36

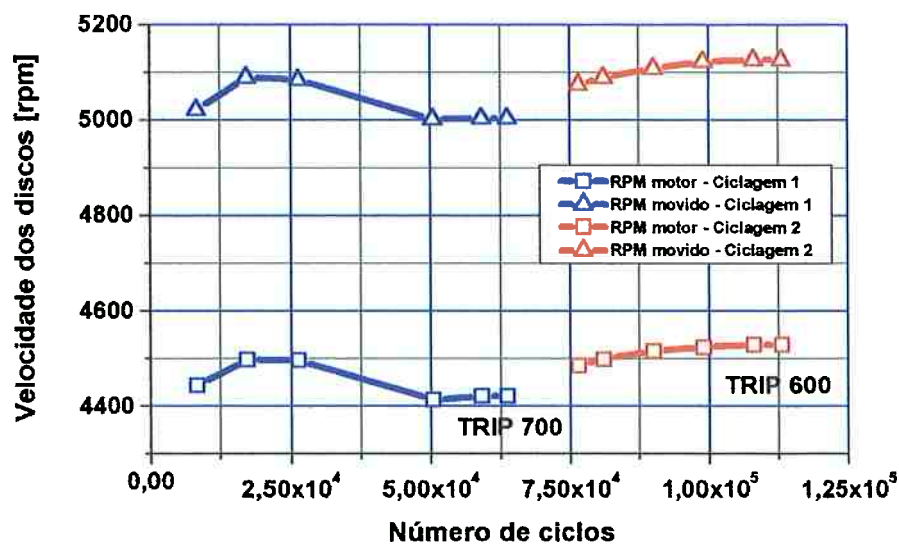
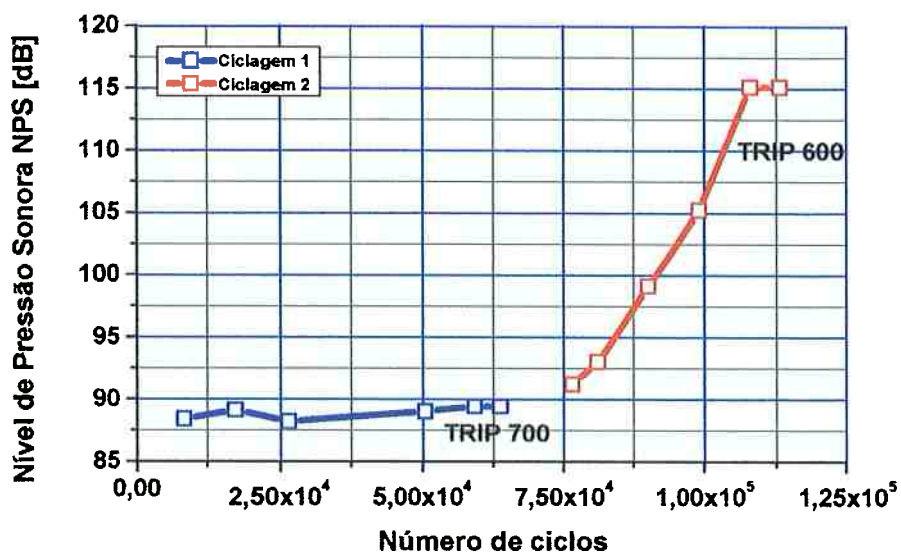


Figura 192. Evolução da carga normal de contato e velocidade durante o ensaio do par de discos M236MR e ADI203mv

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO M2-36



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO M2-36

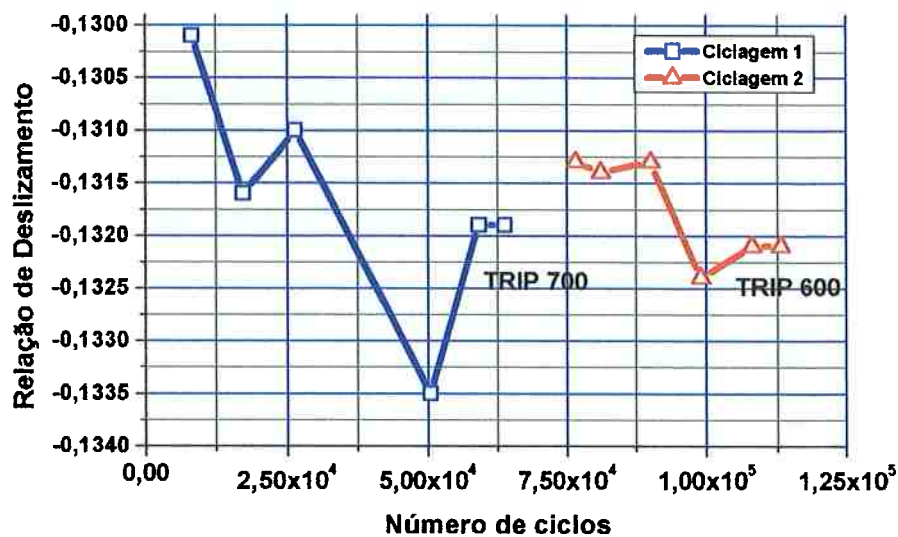
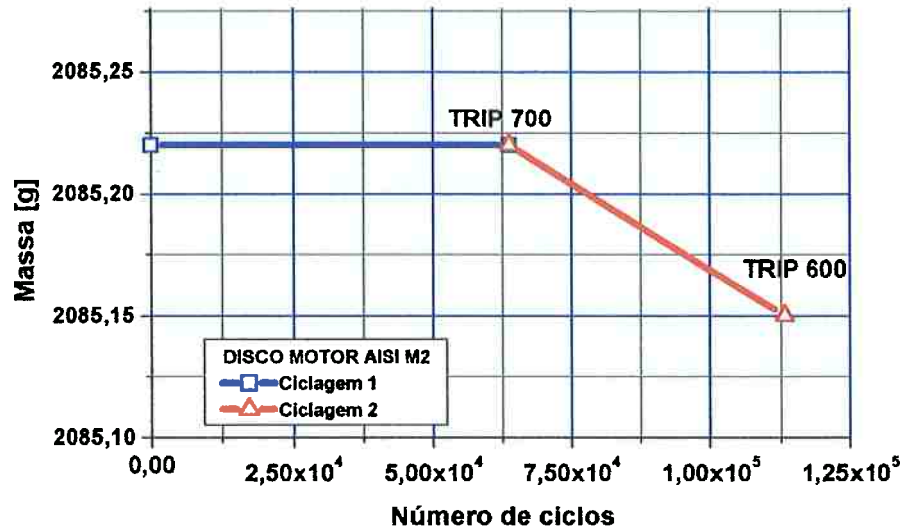


Figura 193. Evolução do Nível de Pressão Sonora e relação de deslizamento durante o ensaio do par de discos M236MR e ADI203mv

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO M2-36



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO M2-36

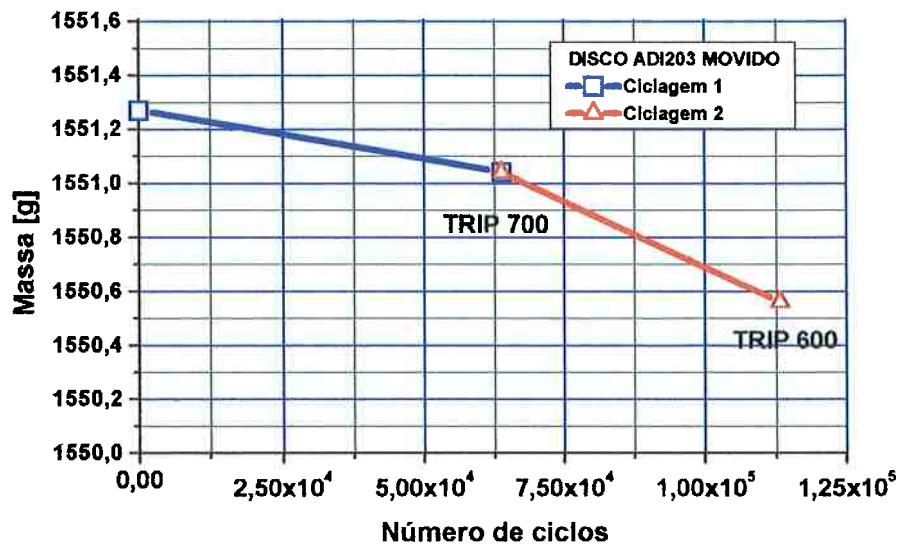


Figura 194. Evolução da perda massa dos discos motor e movido durante o ensaio do par de discos M236MR e ADI203mv

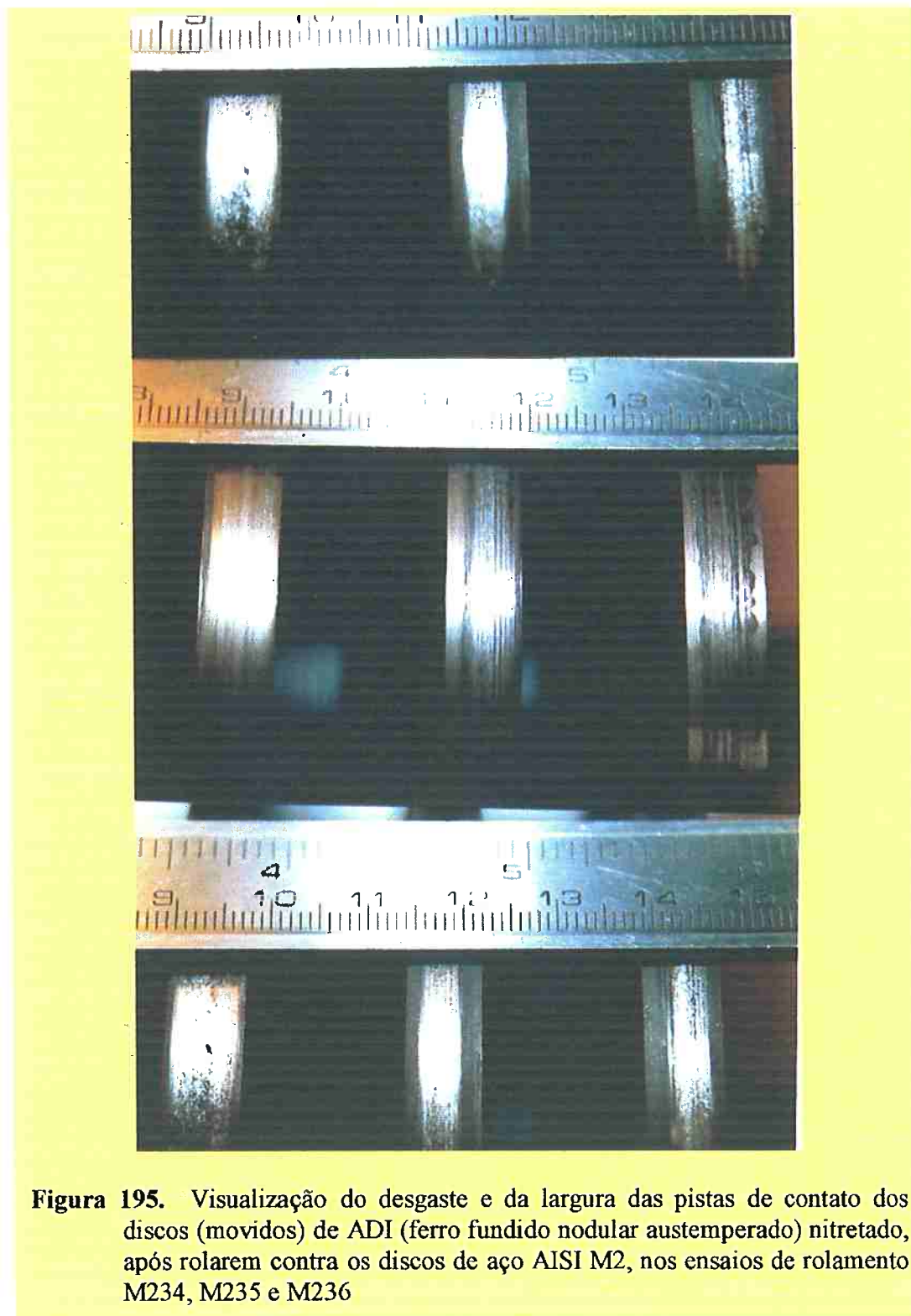
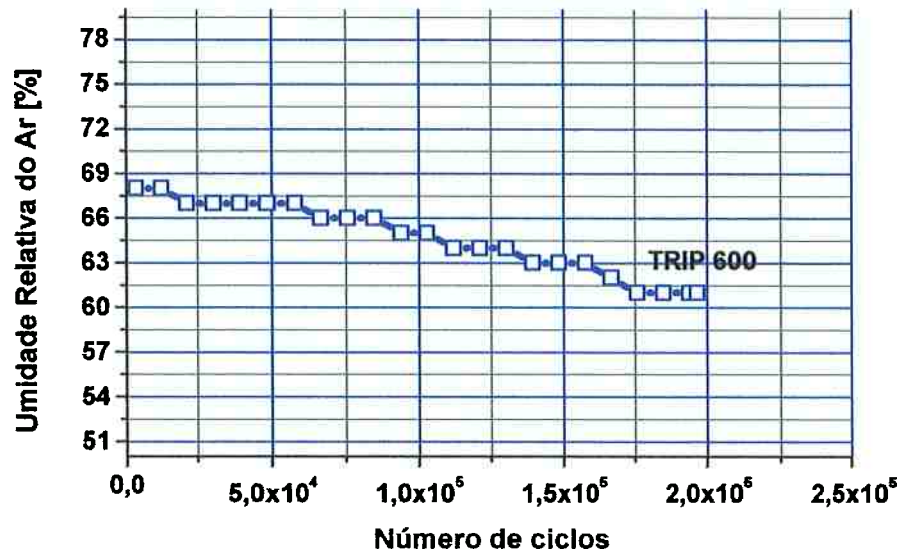


Figura 195. Visualização do desgaste e da largura das pistas de contato dos discos (móveis) de ADI (ferro fundido nodular austemperado) nitretado, após rolarem contra os discos de aço AISI M2, nos ensaios de rolamento M234, M235 e M236

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO M2-37



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO M2-37

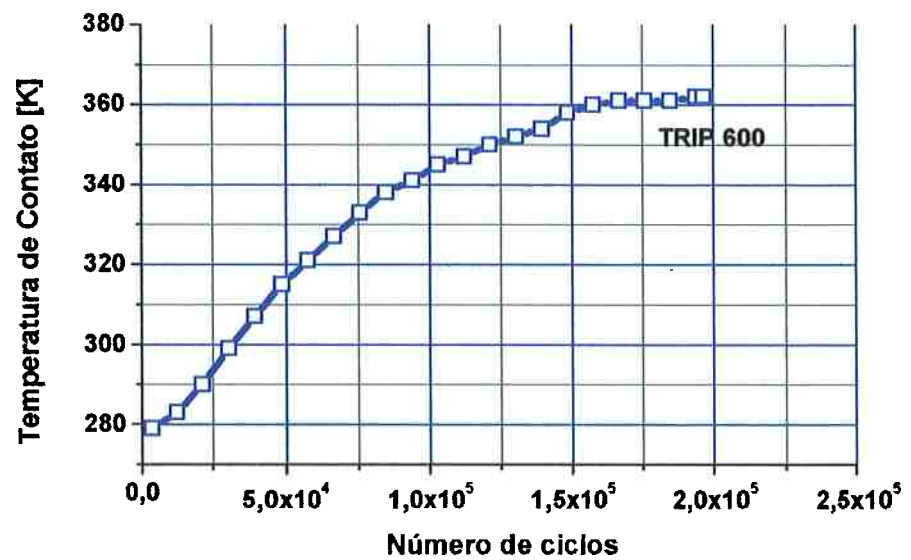
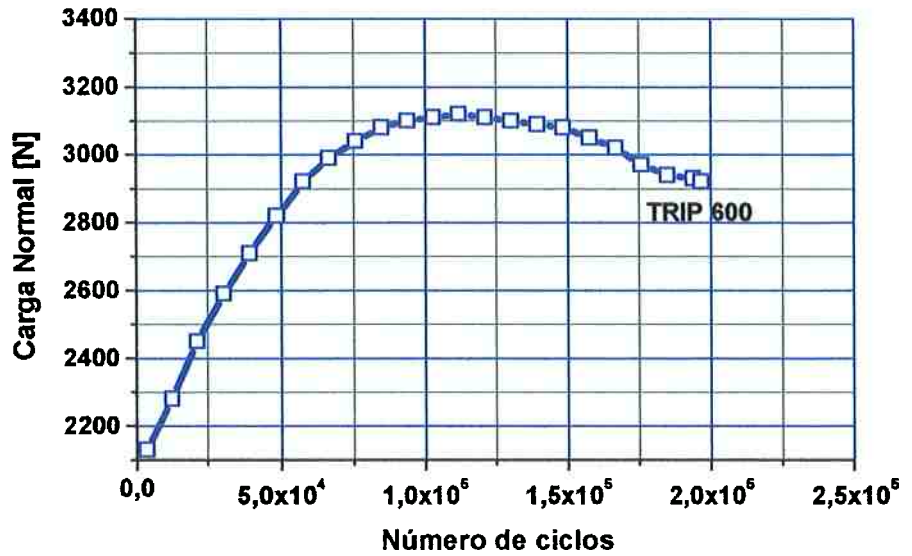


Figura 196. Evolução da umidade da sala e temperatura de contato durante o ensaio do par de discos M237-MR e ADI204-MV

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO M2-37



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO M2-37

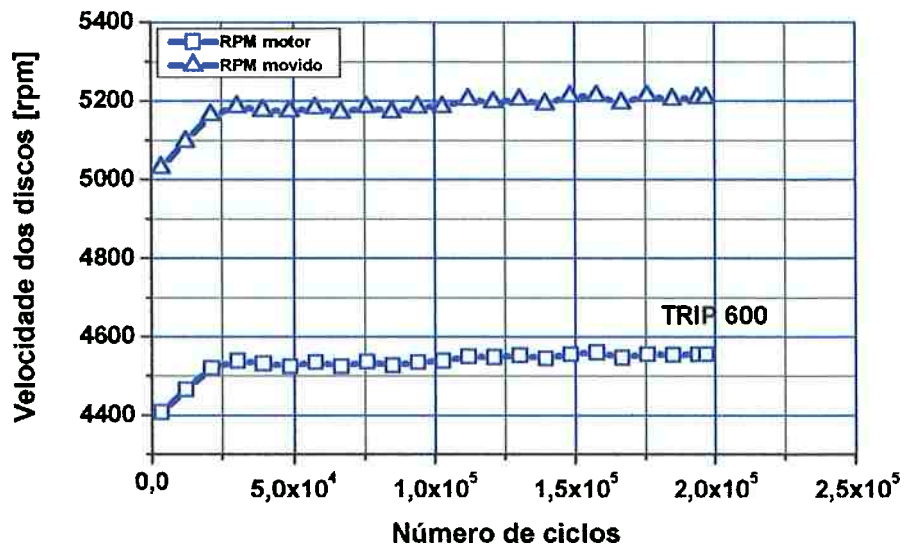
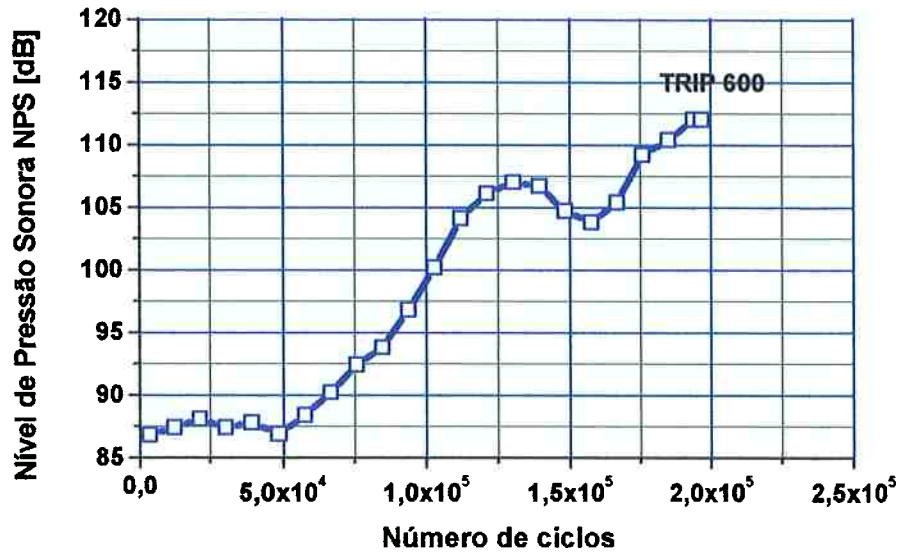


Figura 197. . Evolução da carga normal de contato e velocidade durante o ensaio do par de discos M237-MR e ADI204-MV

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO M2-37



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO M2-37

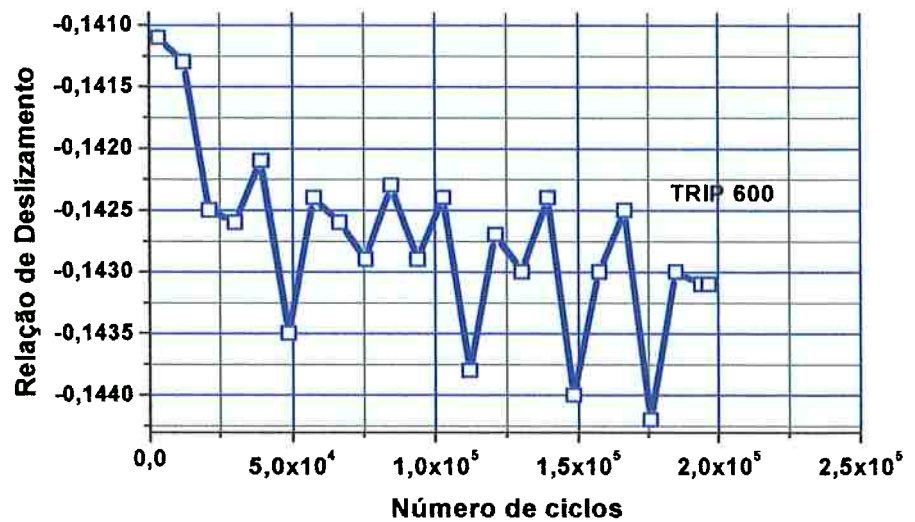
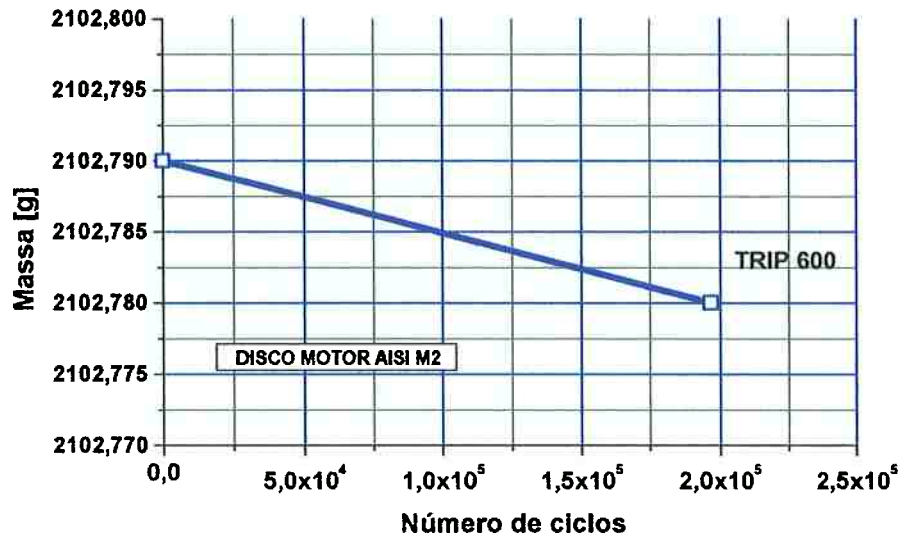


Figura 198. Evolução do Nível de Pressão Sonora e relação de deslizamento durante o ensaio do par de discos M237-MR e ADI204-MV

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO M2-37



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO M2-37

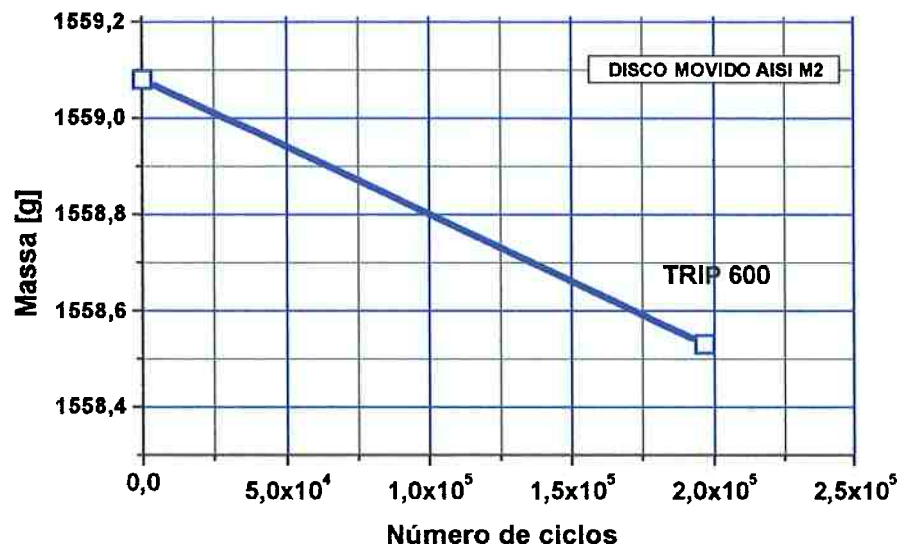
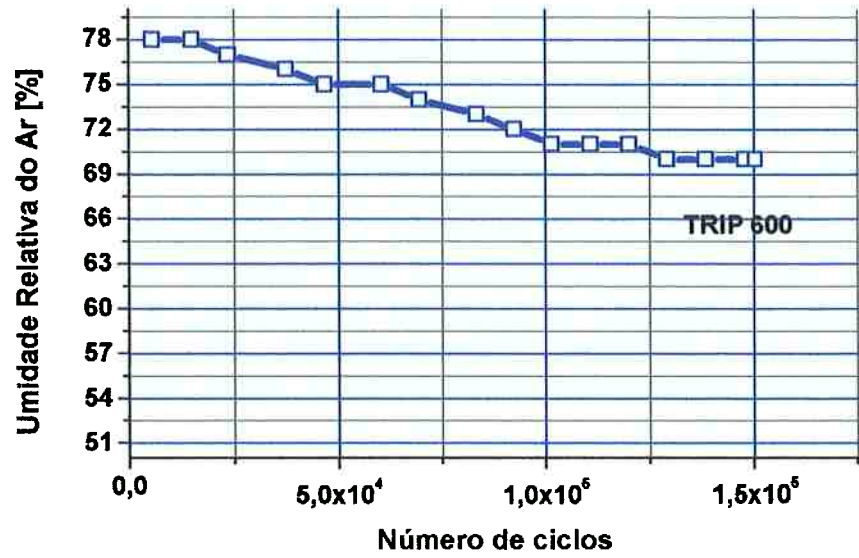


Figura 199. Evolução da perda massa dos discos motor e movido durante o ensaio do par de discos M237-MR e ADI204-MV

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO M2-38



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO M2-38

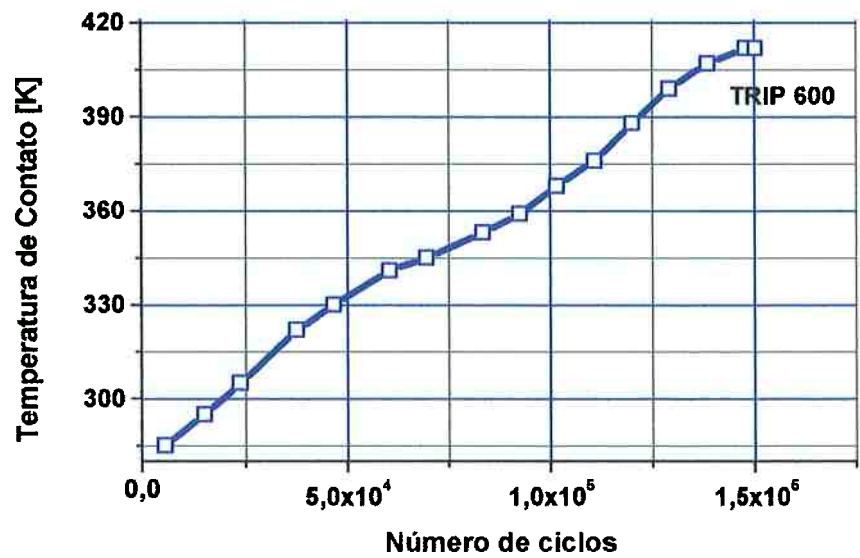
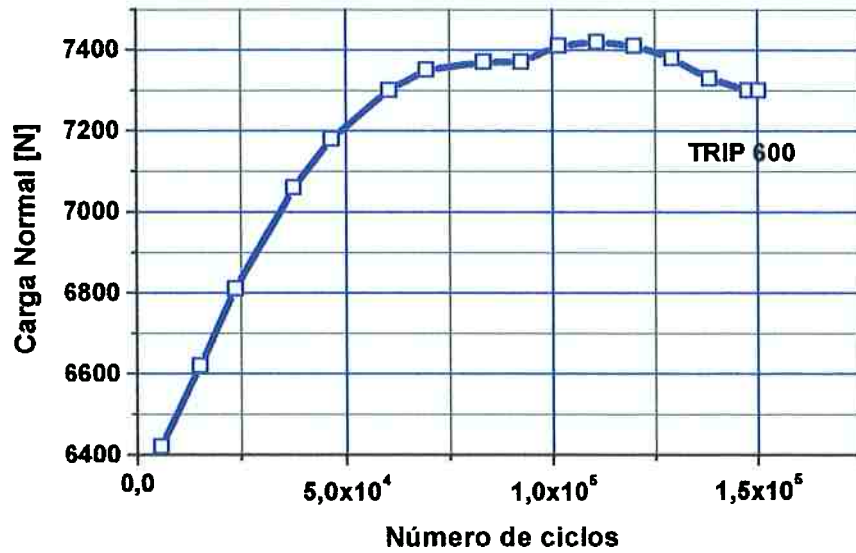


Figura 200. Evolução da umidade da sala e temperatura de contato durante o ensaio do par de discos M238MR e ADI205

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO M2-38



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO M2-38

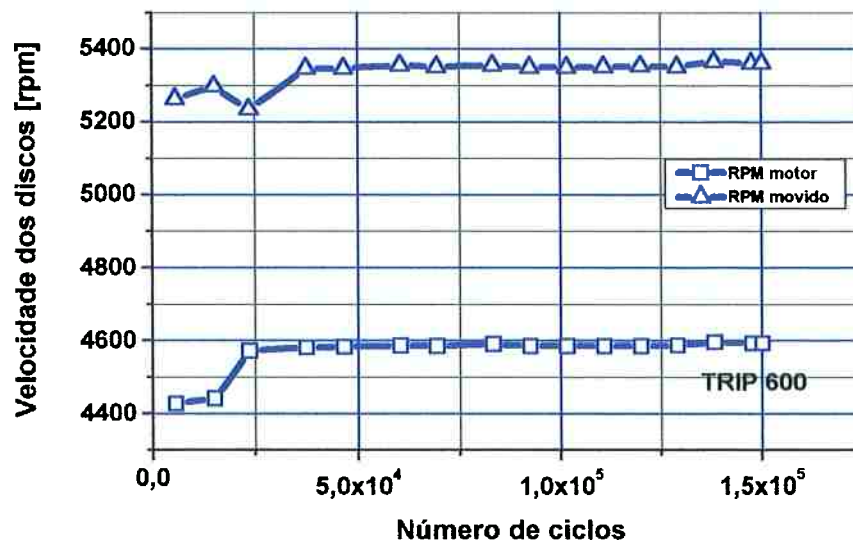
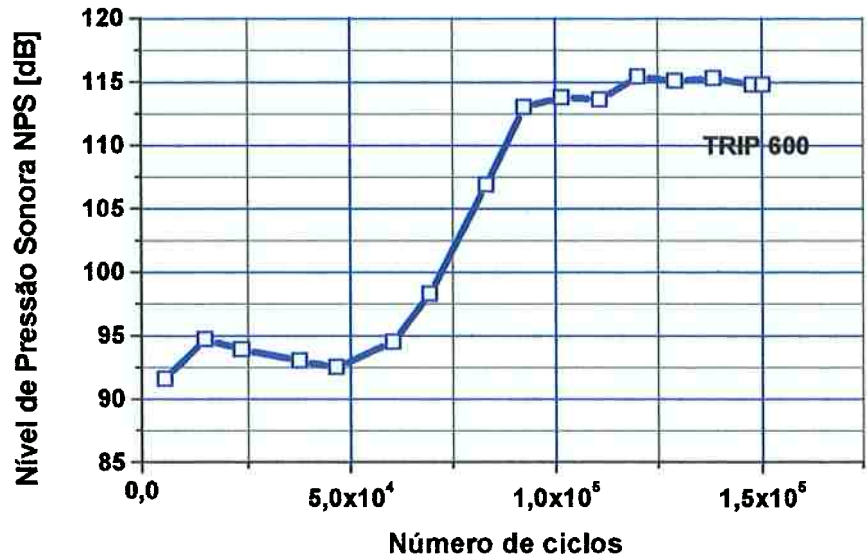


Figura 201. Evolução da carga normal de contato e velocidade durante o ensaio do par de discos M238MR e ADI205

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO M2-38



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO M2-38

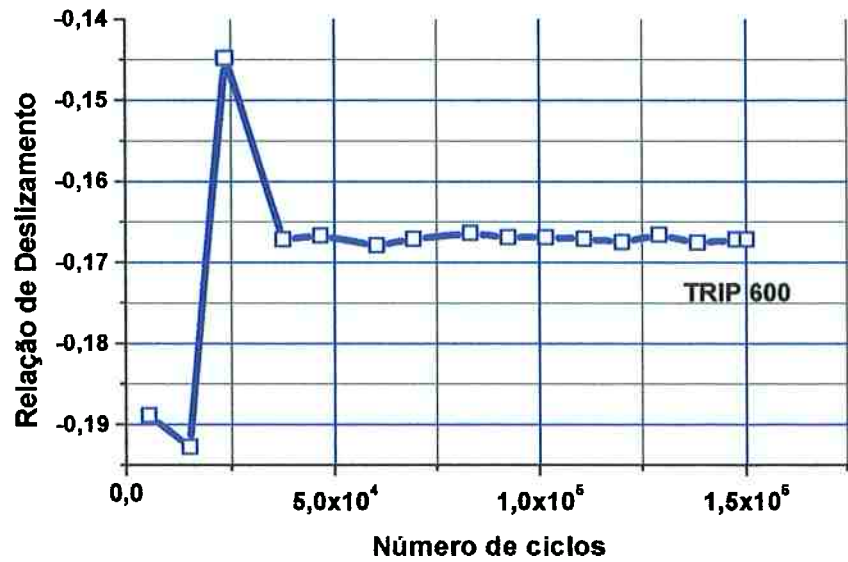
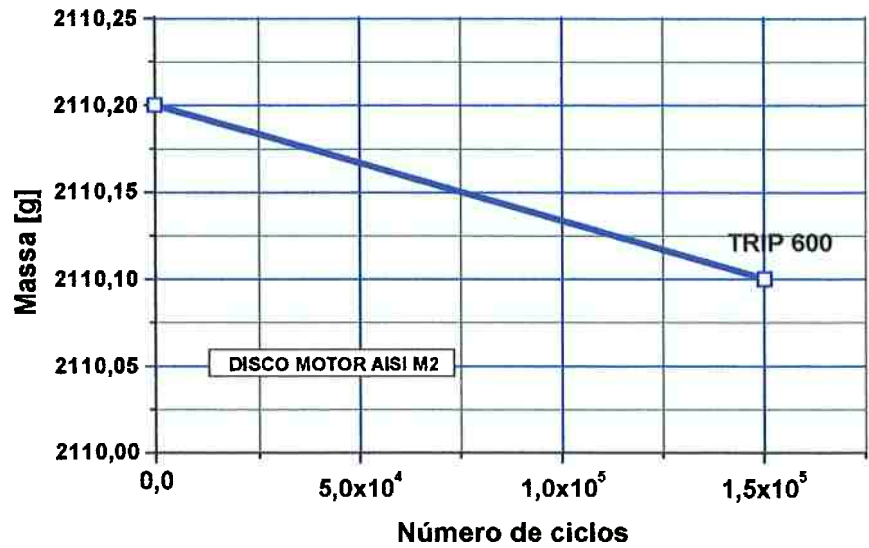


Figura 202. Evolução do Nível de Pressão Sonora e relação de deslizamento durante o ensaio do par de discos M238MR e ADI205

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO M2-38



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO M2-38

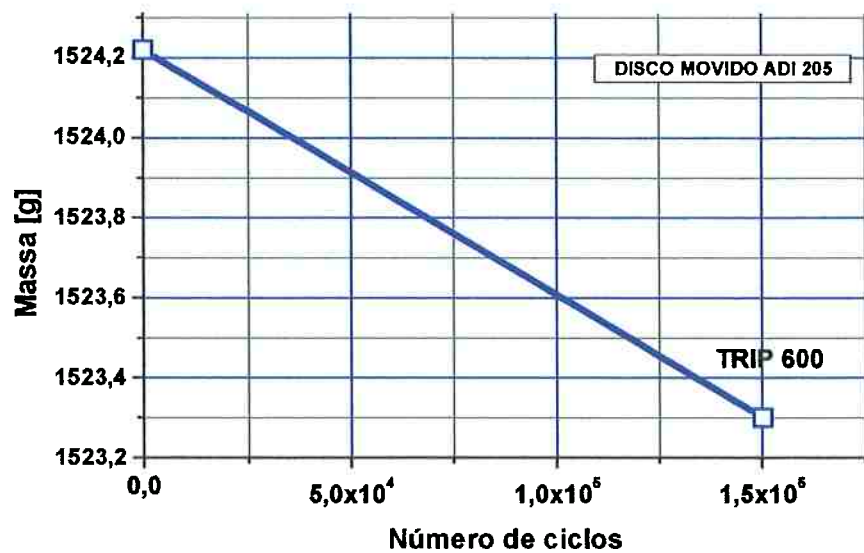


Figura 203. Evolução da perda massa dos discos motor e movido durante o ensaio do par de discos M238MR e ADI205

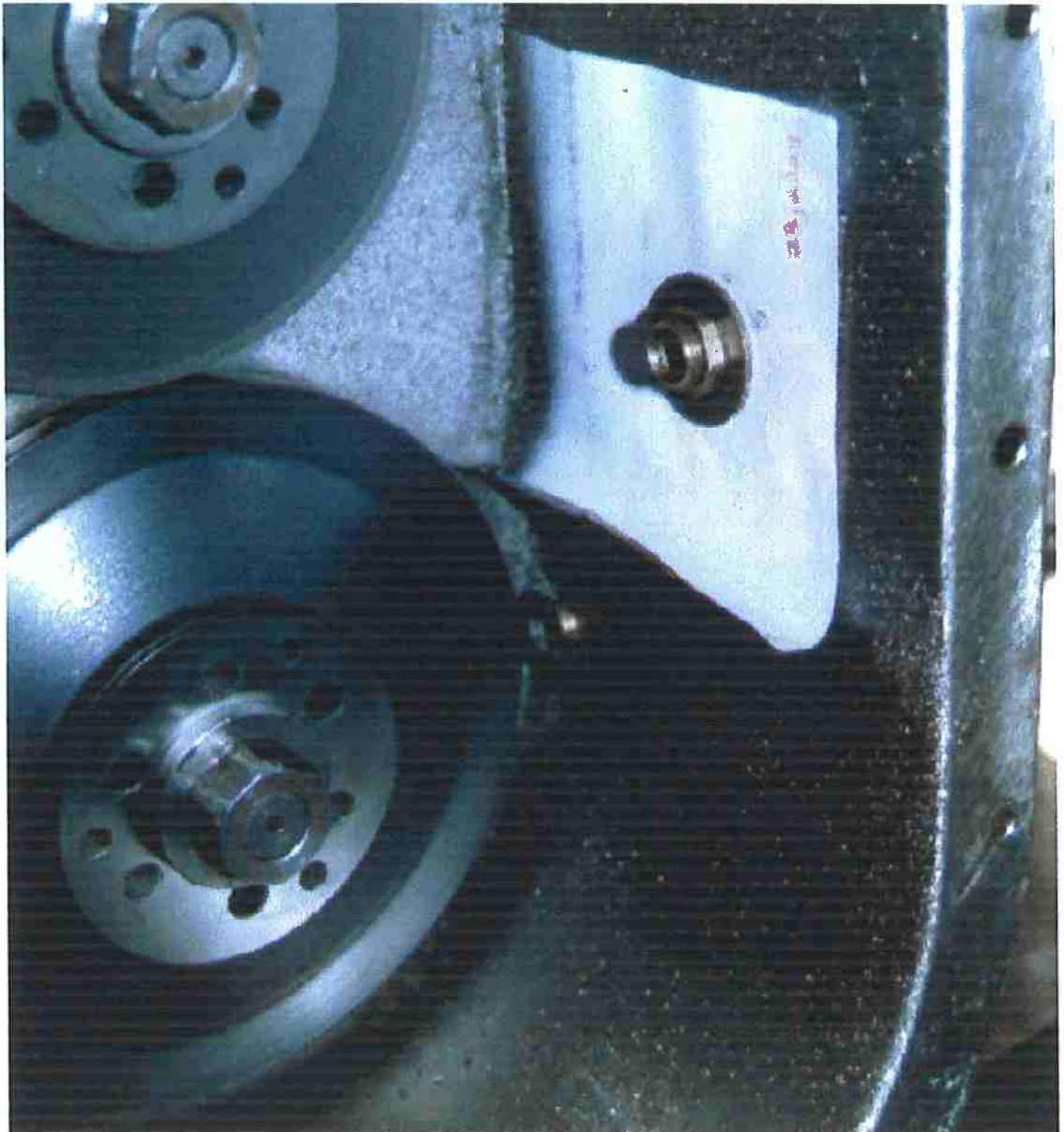
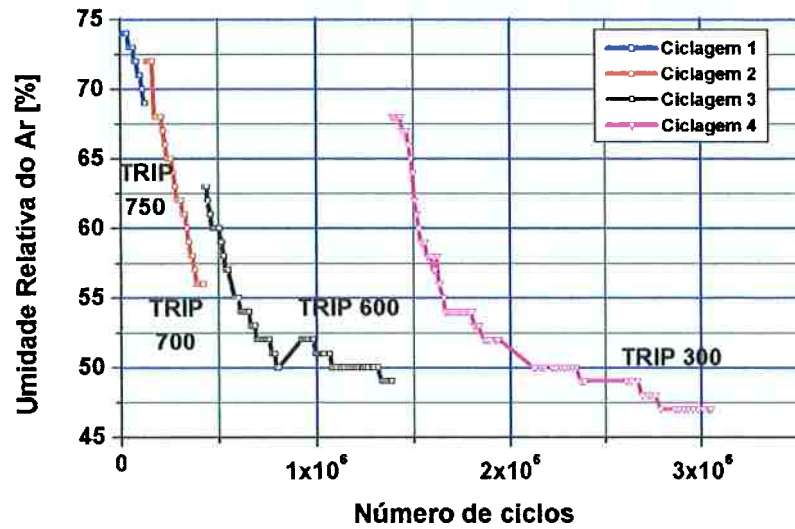


Figura 204. Visualização do gabinete disco-disco, composto pelo disco inferior, motor, aço AISI M2 (diâmetro 160,02 mm), disco superior, movido, ADI nitretado (diâmetro 137,12 mm) e pelo papel porta-partículas de desgaste após o ensaio de rolamento M2-38

A coroa circular externa do disco motor é maior que a do disco movido, pois este disco de ADI já havia sido anteriormente ensaiado, extraída por eletroerosão a sua pista de rolamento para análise, torneado e retificado de perfil para este novo ensaio]

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO M2-M2



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO M2-M2

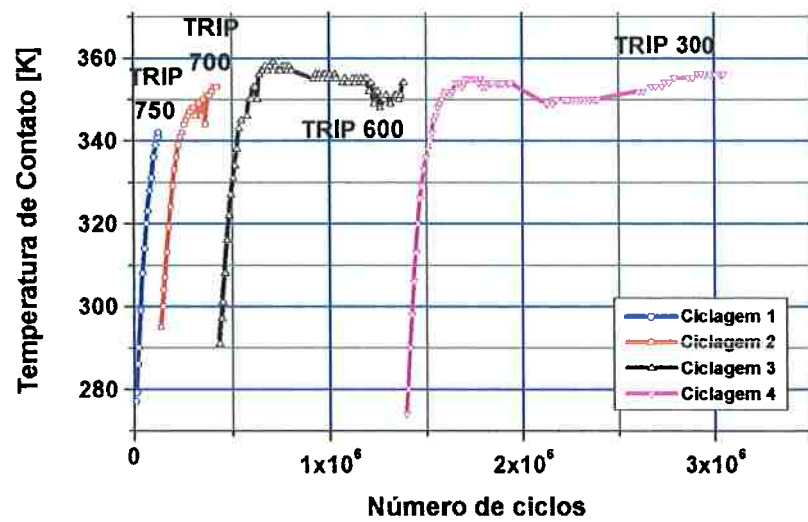
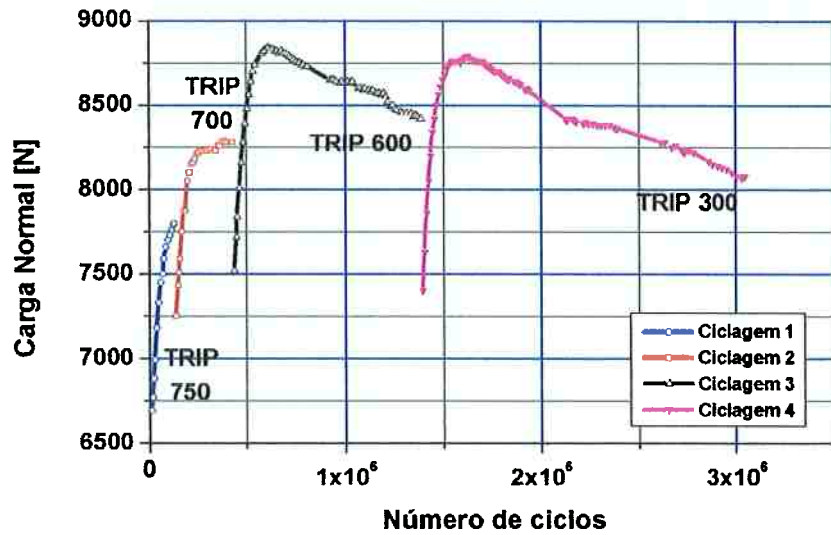


Figura 205. Evolução da umidade da sala e temperatura de contato durante o ensaio M240 do par de discos M237MR e M234mrV

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO M2-M2



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO M2-M2

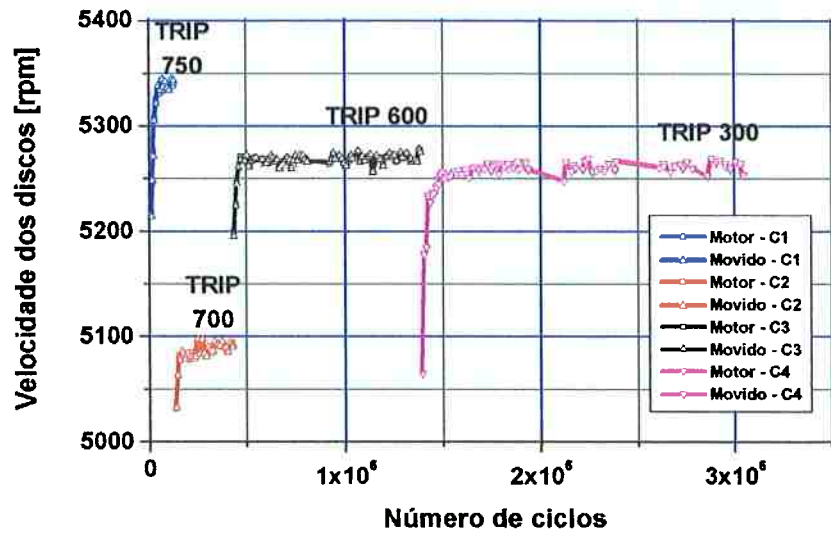
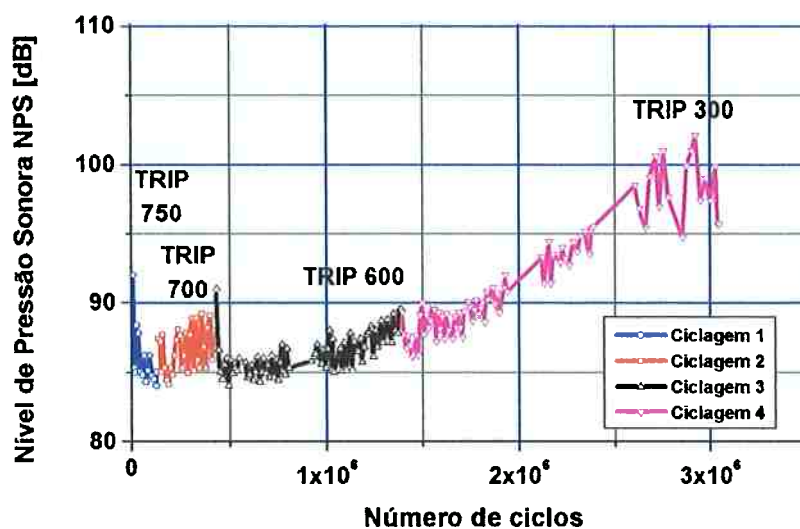


Figura 206. Evolução da carga normal de contato e velocidade durante o ensaio M240 do par de discos M237MR e M234mrV

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO M2-M2



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO M2-M2

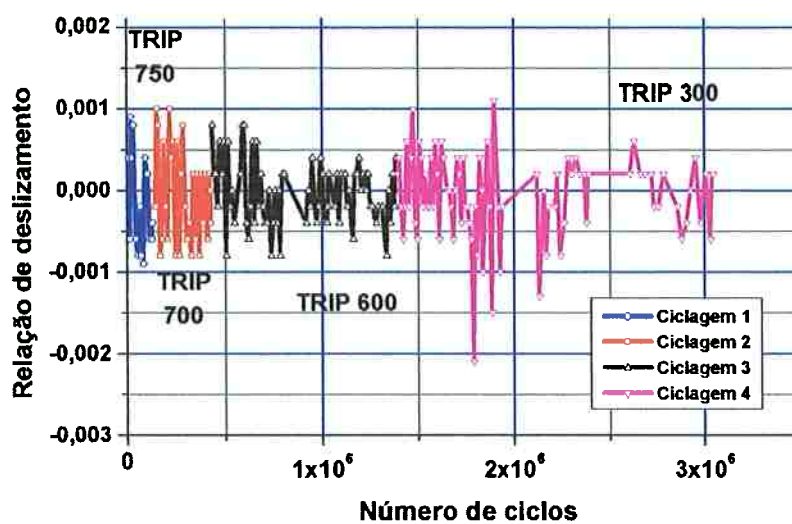
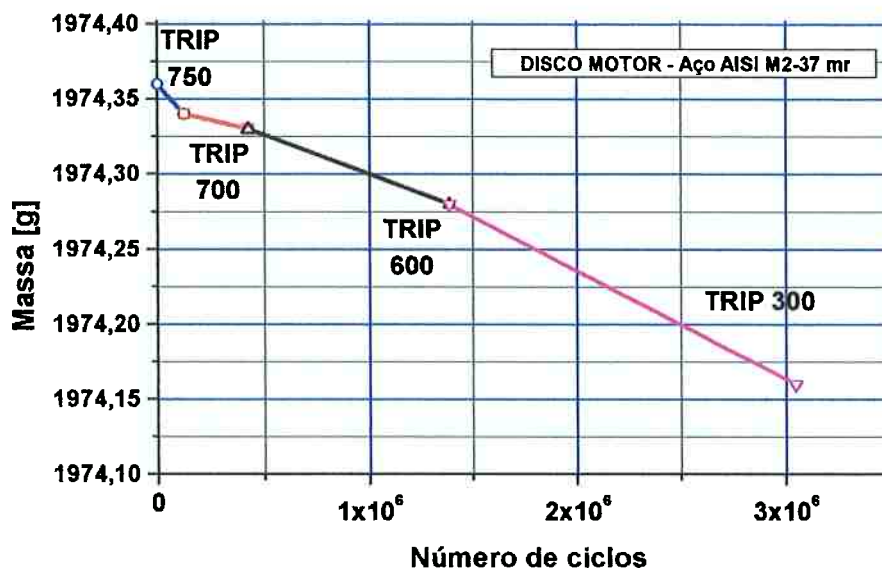


Figura 207. Evolução do Nível de Pressão Sonora e relação de deslizamento durante o ensaio M240 do par de discos M237MR e M234mrV

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO M2-M2



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO M2-M2

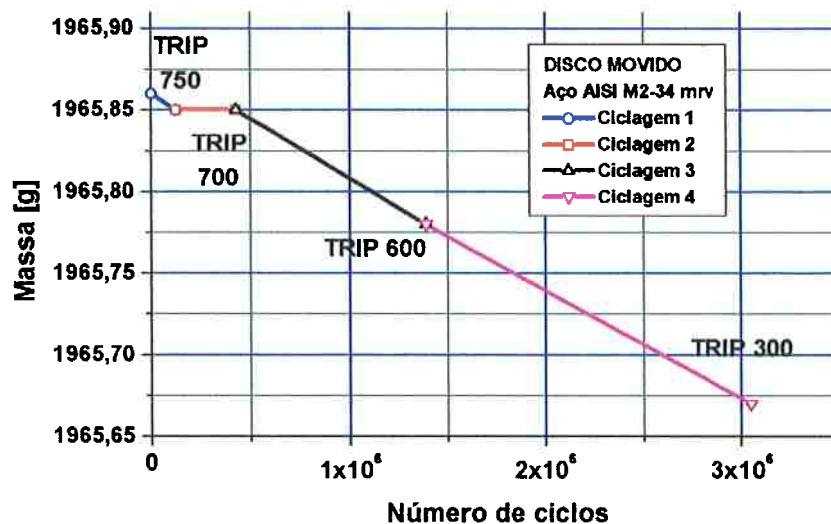
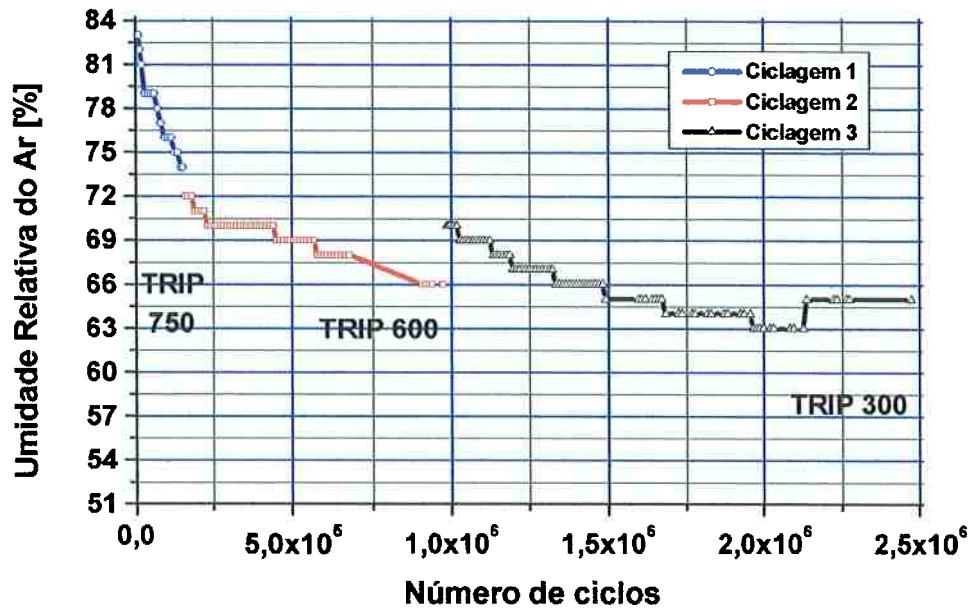


Figura 208. Evolução da perda massa dos discos motor e movido durante o do par de discos M237MR e M234mrV

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO

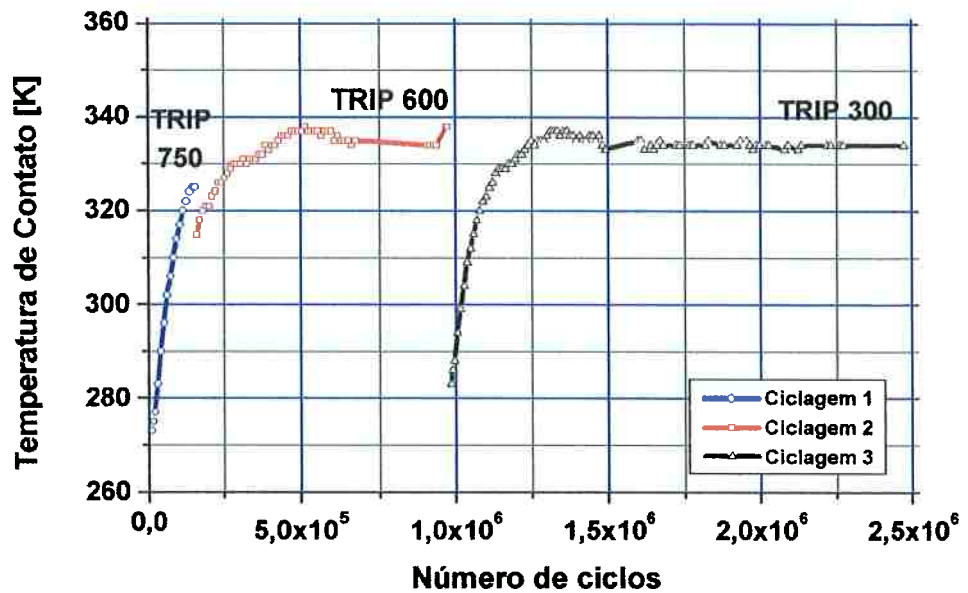
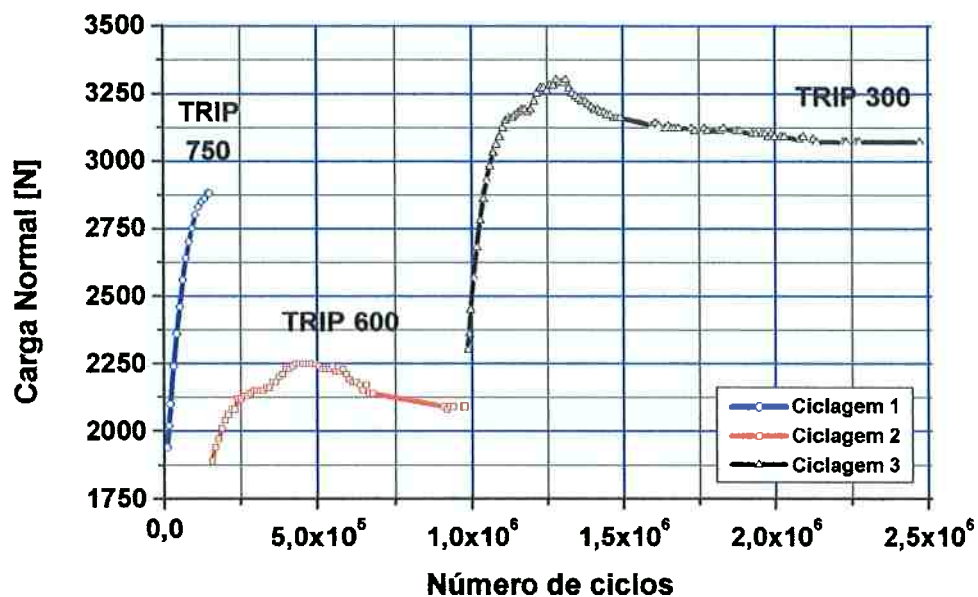


Figura 209. Evolução da umidade da sala e temperatura de contato durante o ensaio ER89 dos discos de Aço AISI 52100 SBQT e Aço AISI 52100 OQT (movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO

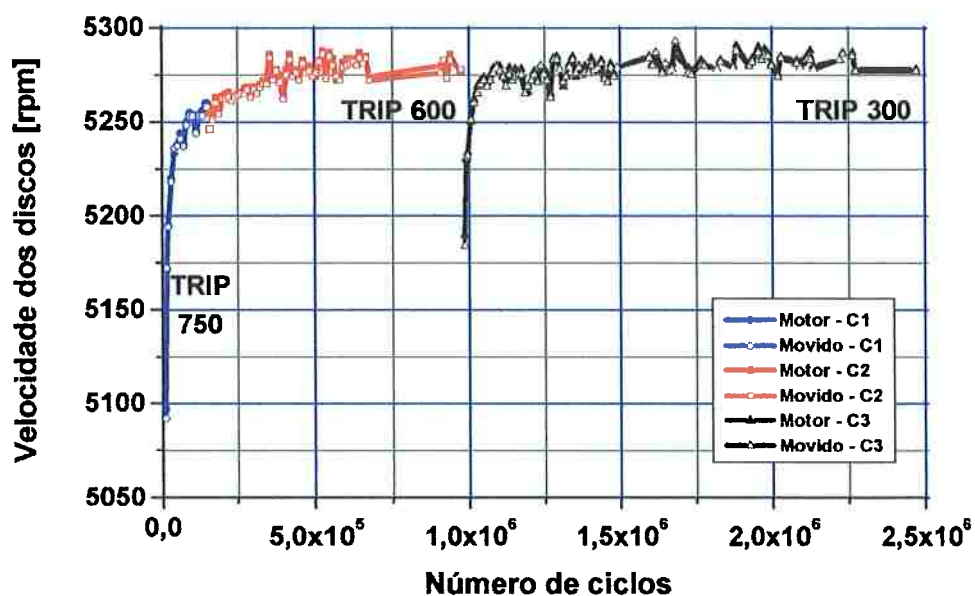
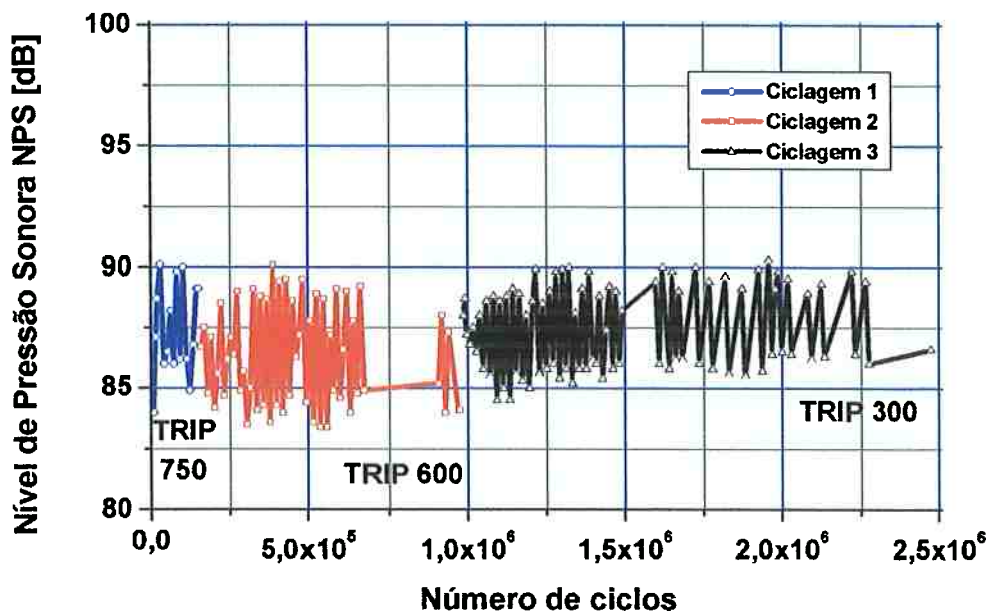


Figura 210. Evolução da carga normal de contato e velocidade durante o ensaio ER89 dos discos de Aço AISI 52100 SBQT (motor) e Aço AISI 52100 OQT (movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO

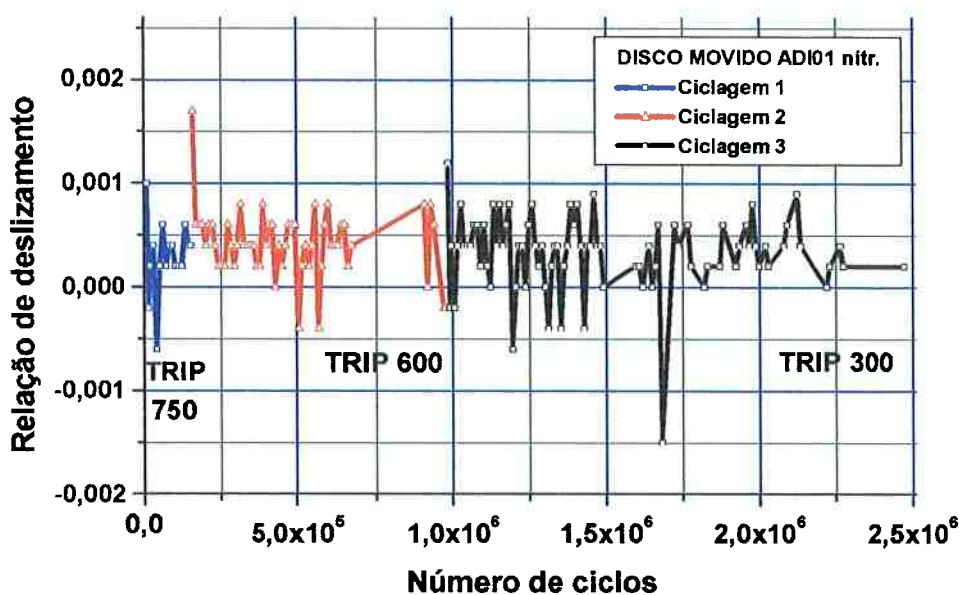
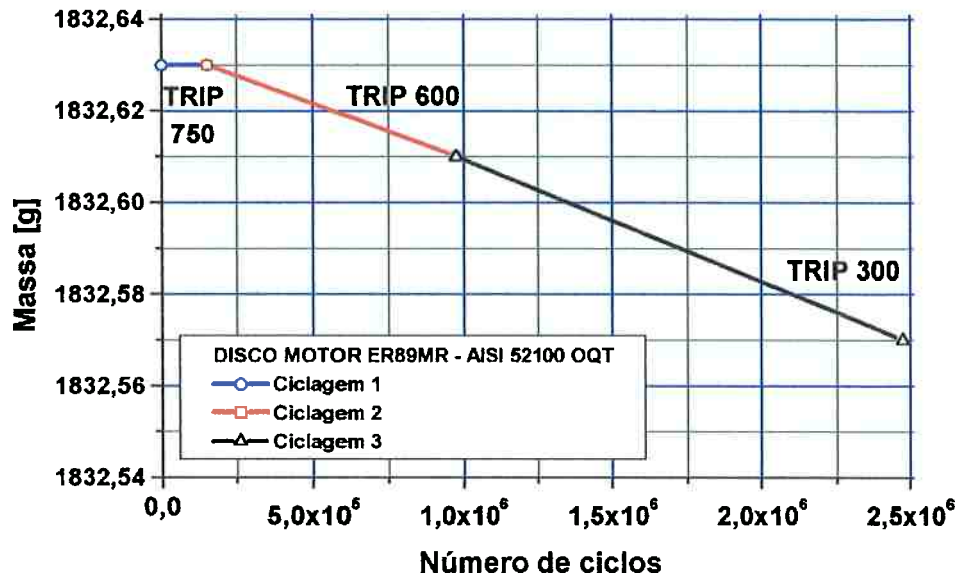


Figura 211. Nível de Pressão Sonora e relação de deslizamento durante o ensaio ER89 dos discos de Aço AISI 52100 SBQT (motor) e Aço AISI 52100 OQT (movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO

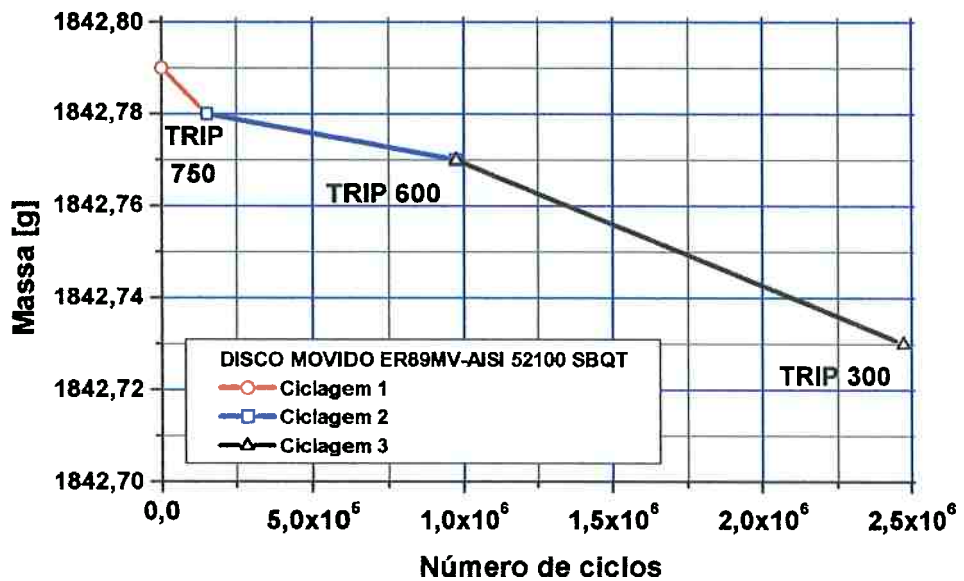
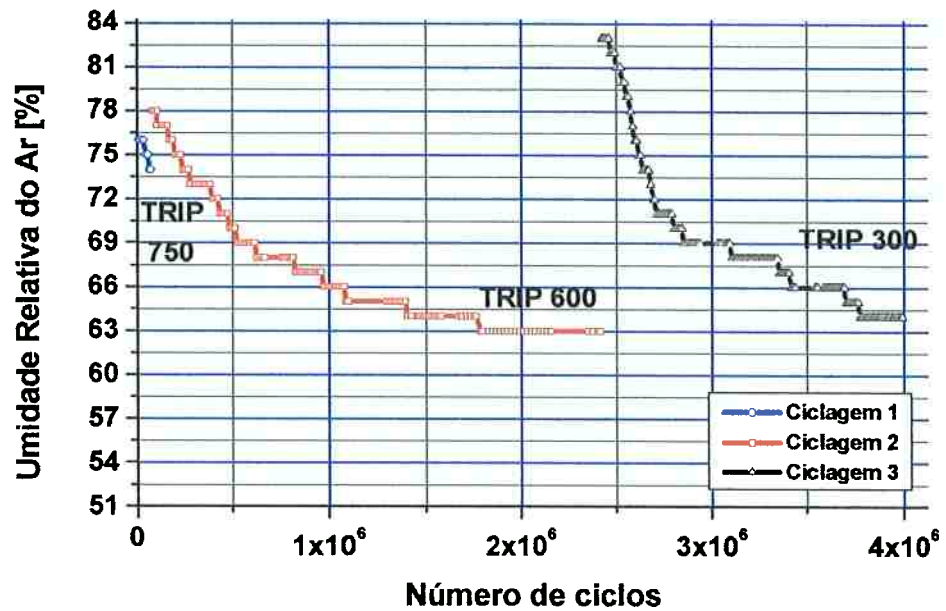


Figura 212. Perda de massa dos discos motor e movido durante o ensaio ER89 dos discos de Aço AISI 52100 SBQT (motor) e Aço AISI 52100 OQT (movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO

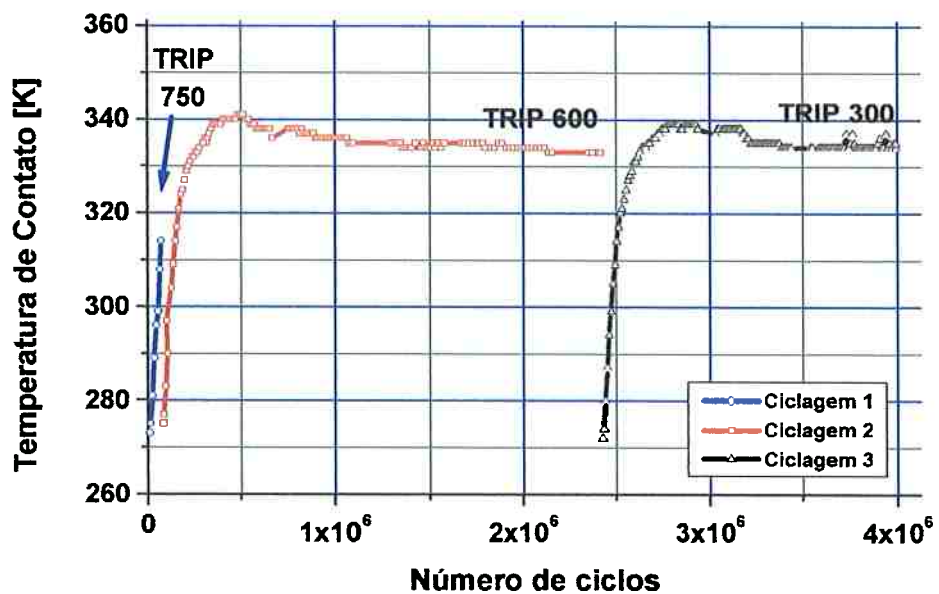
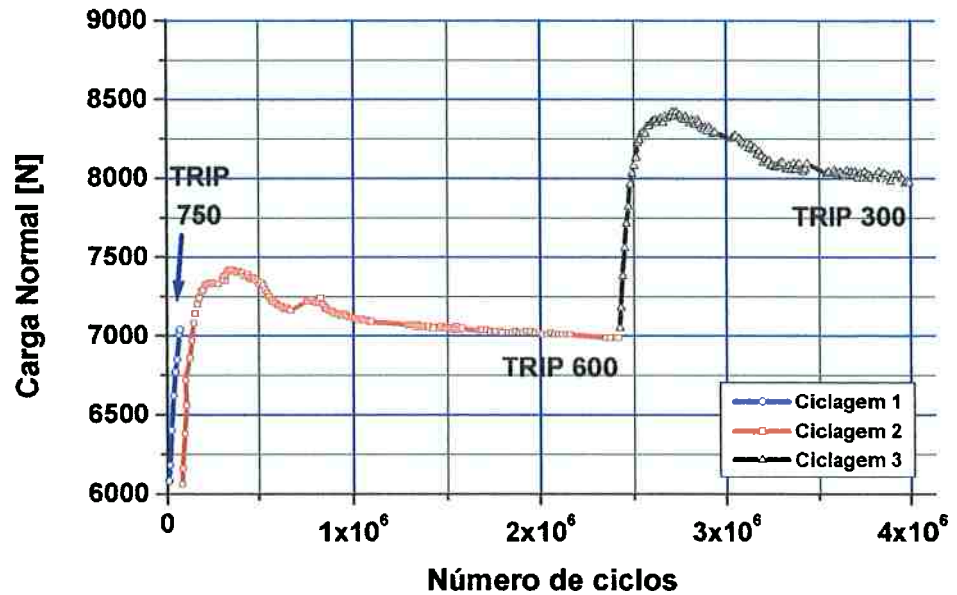


Figura 213. Evolução da umidade da sala e temperatura de contato durante o ensaio ER80 dos discos de Aço AISI 52100 OOT (motor) e Aço AISI 52100 SBOT (movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO

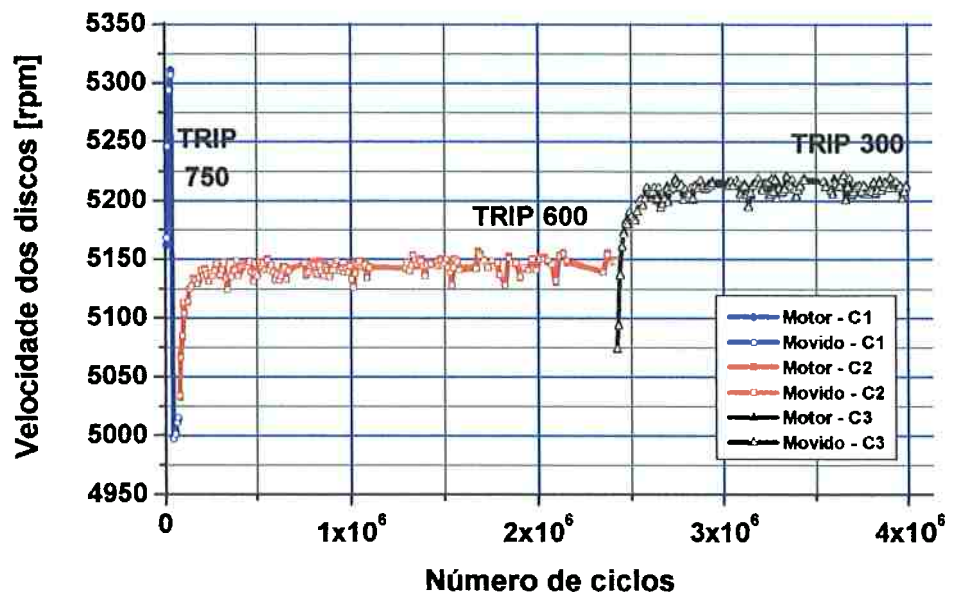
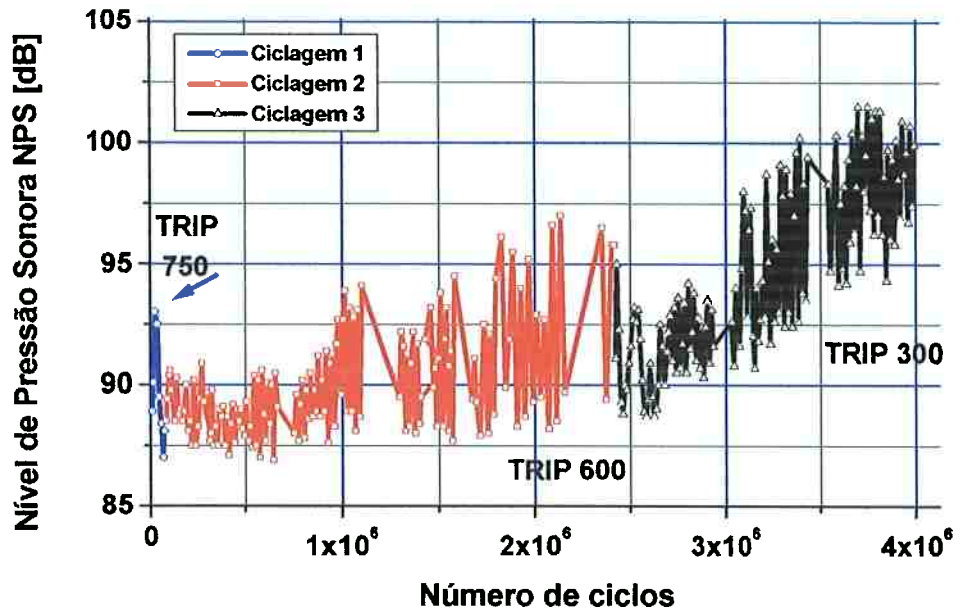


Figura 214. Evolução da carga normal de contato e velocidade durante o ensaio ER80 dos discos de Aço AISI 52100 OQT (motor) e Aço AISI 52100 SBQT (movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO

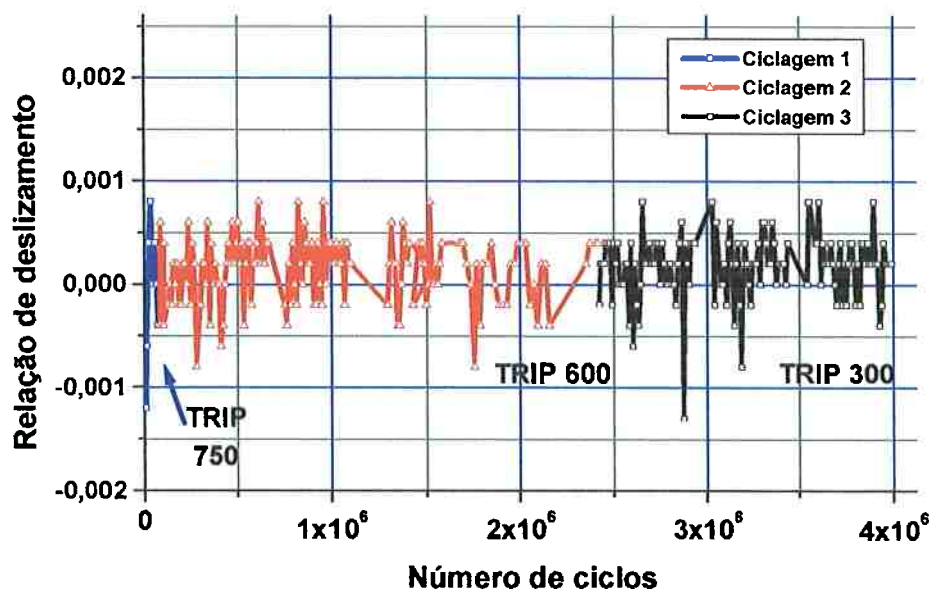
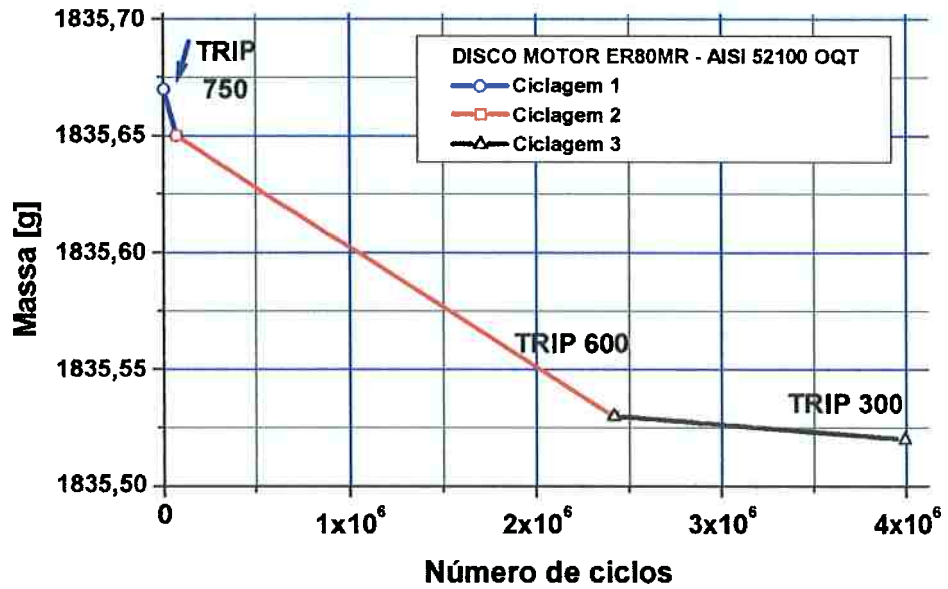


Figura 215. Evolução do Nível de Pressão Sonora e relação de deslizamento durante o ensaio ER80 dos discos de Aço AISI 52100 OQT e Aço AISI 52100 SBQT (movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO

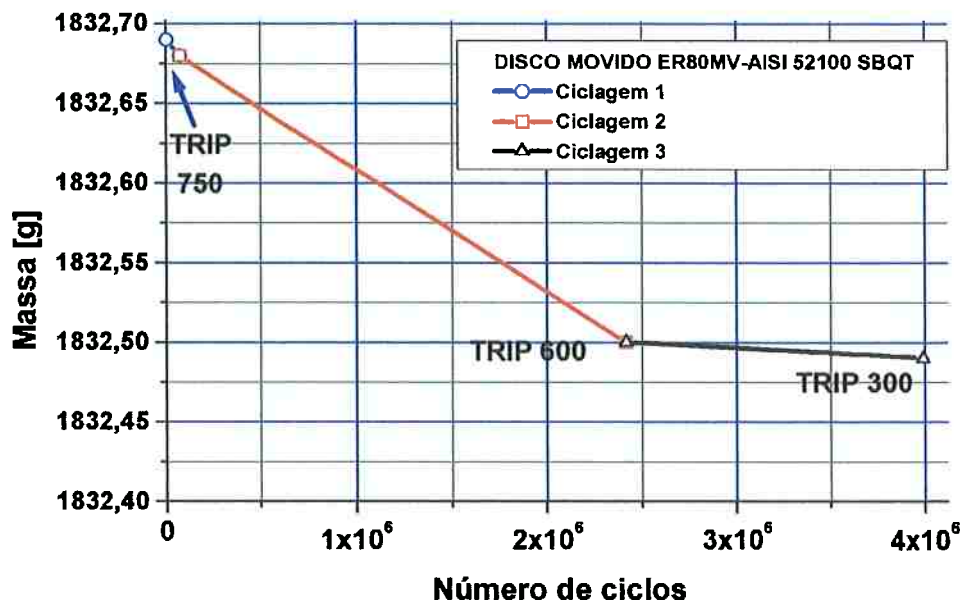


Figura 216. Evolução da perda de massa dos discos motor e movido durante o ensaio ER80 dos discos de Aço AISI 52100 OQT (motor) e Aço AISI 52100 SBOT (movido)

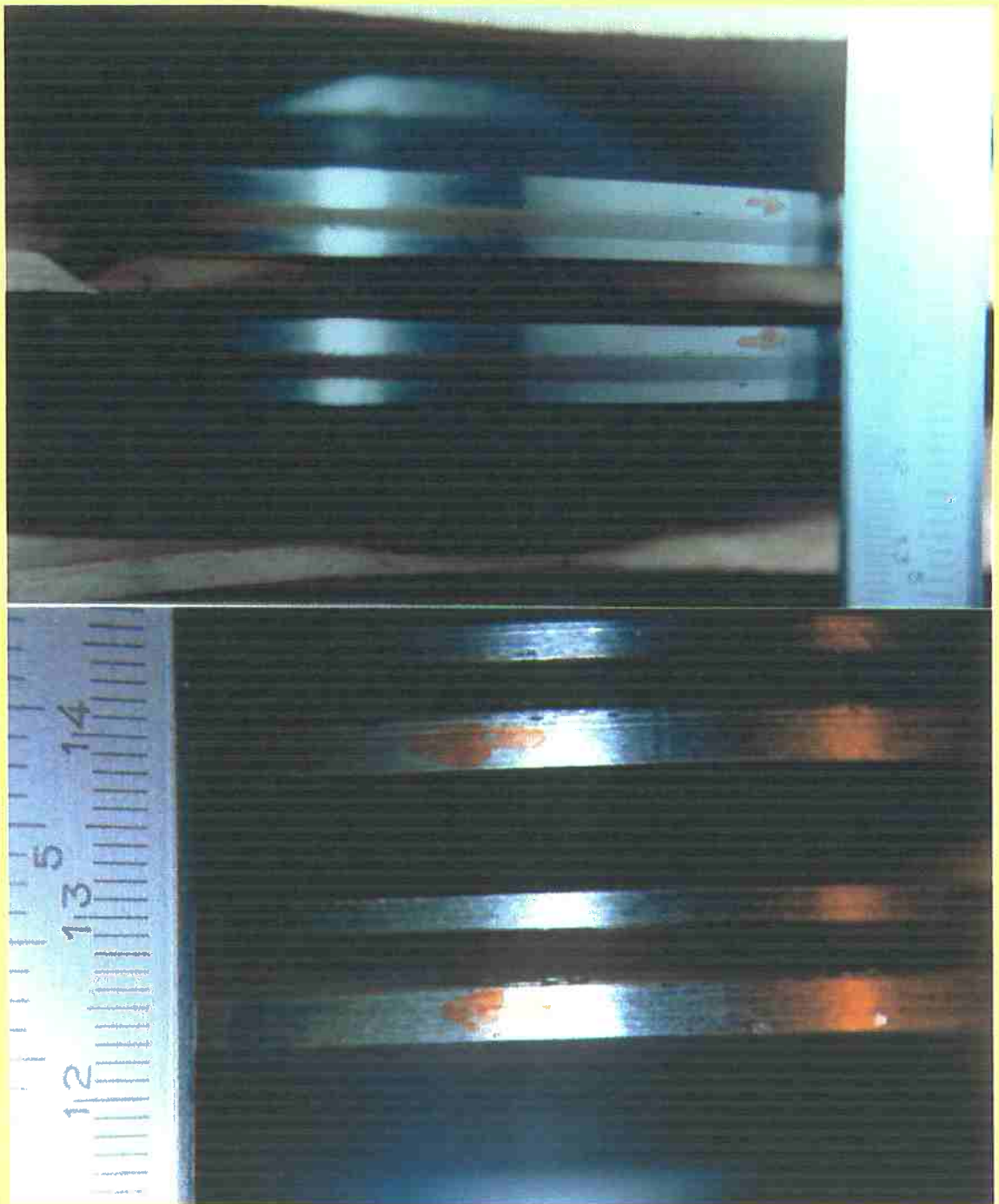
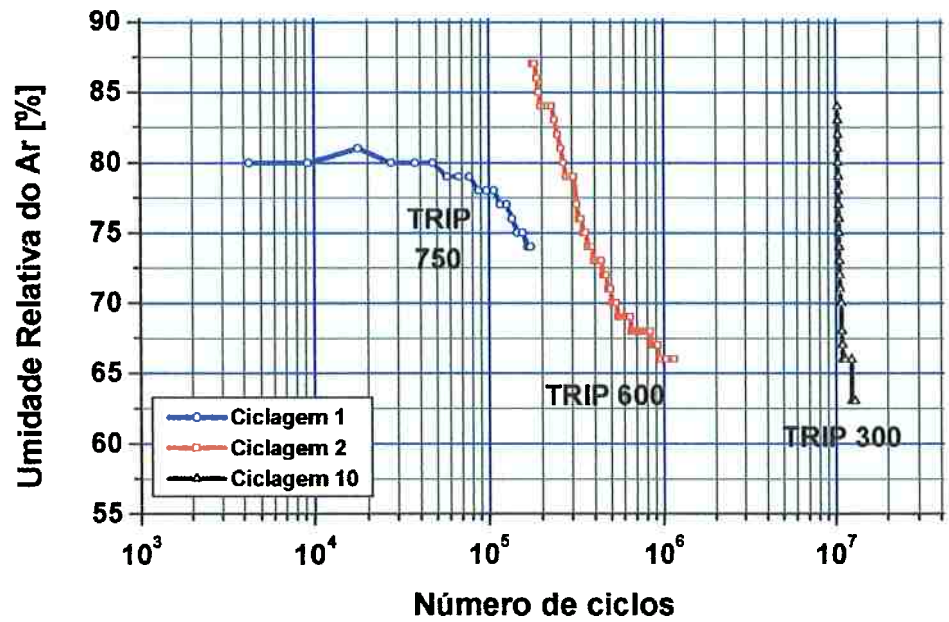


Figura 217. Evolução da largura da trilha de contato entre as pistas esféricas dos discos no ensaio er 80: acima, após 69.343 ciclos (Trip 750) e, abaixo, após 2,42 milhões de ciclos (Trip 300)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO

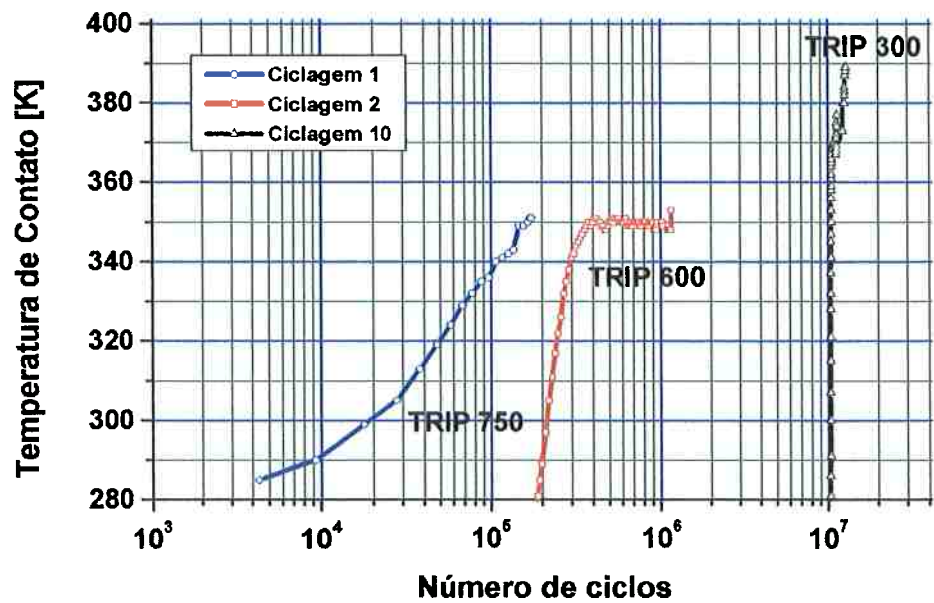
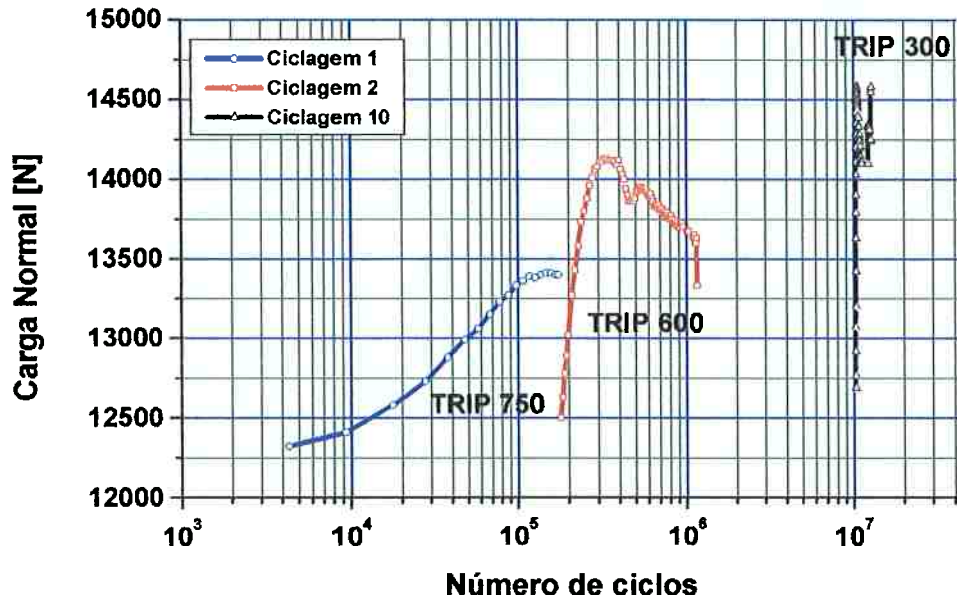


Figura 218. Evolução da umidade da sala e temperatura de contato durante o ensaio ER61 dos discos de Aço AISI 52100 SBOT (motor) e Aço AISI 52100 SBOT (movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO

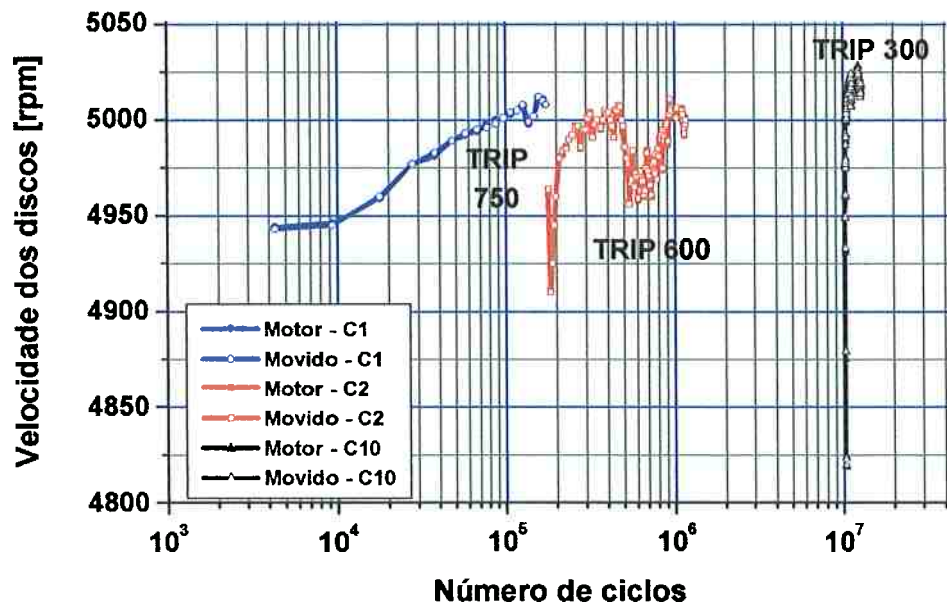
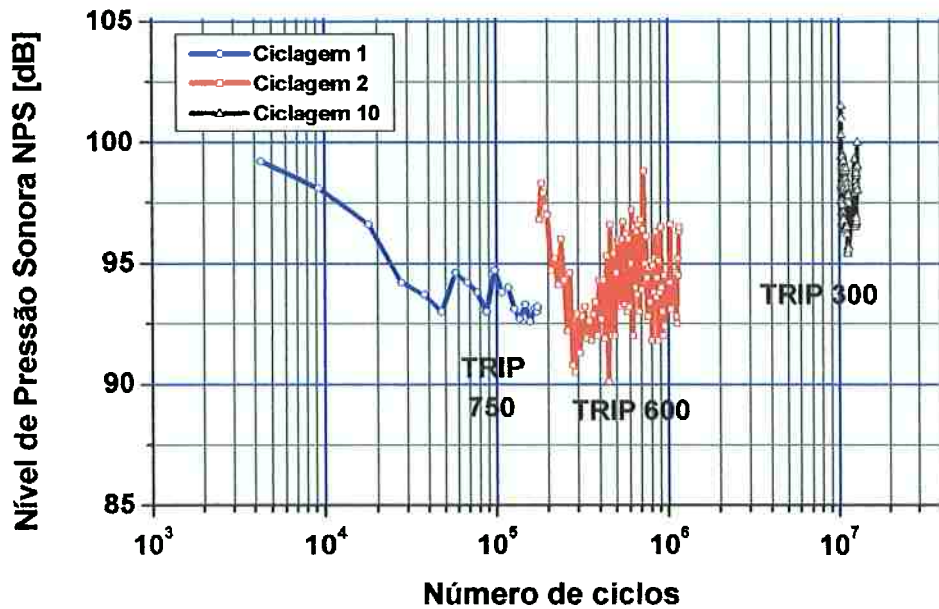


Figura 219. Evolução da carga normal de contato e velocidade durante o ensaio ER61 dos discos de Aço AISI 52100 SBOT (motor) e Aço AISI 52100 SBOT (movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO

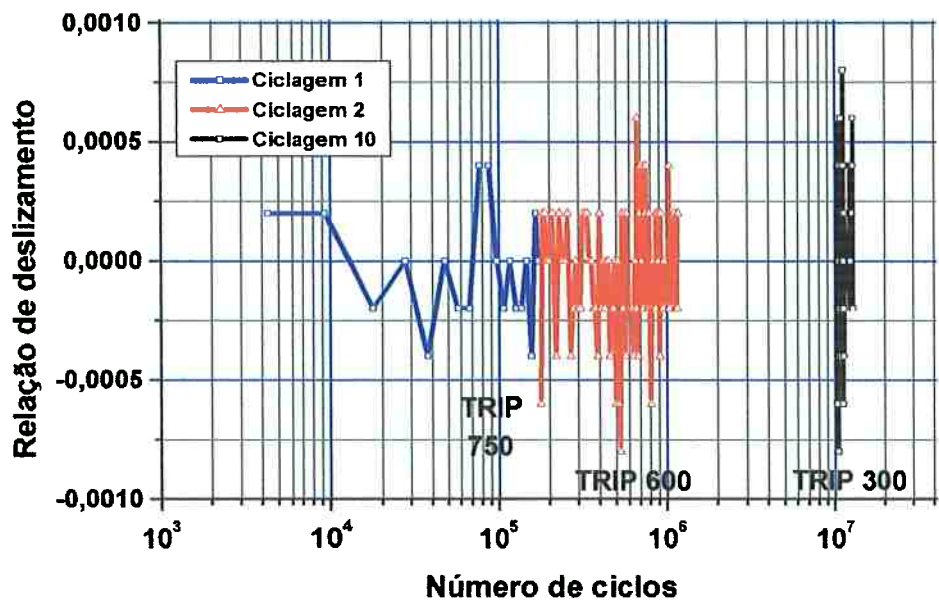
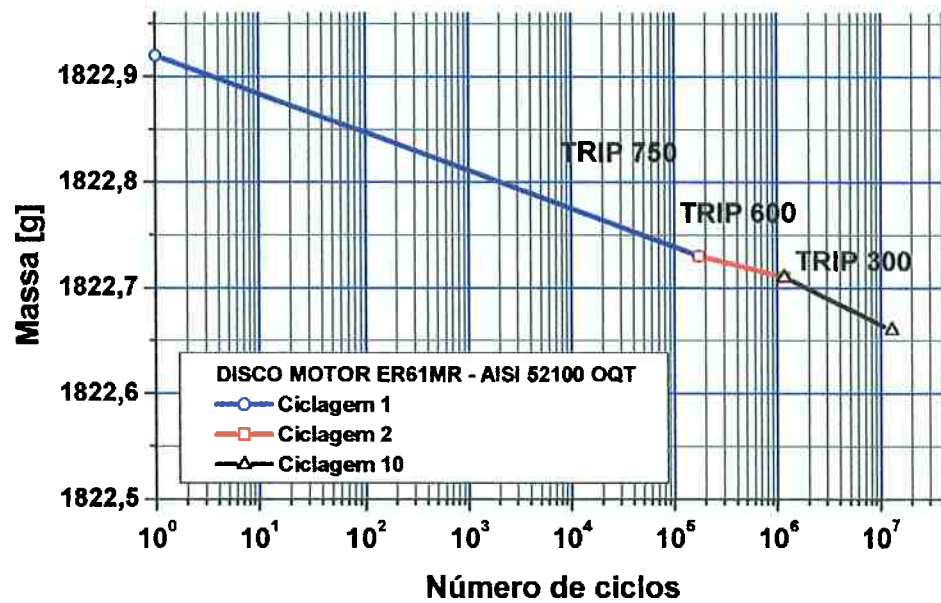


Figura 220. Evolução do Nível de Pressão Sonora e relação de deslizamento no ensaio ER61 dos discos de Aço AISI 52100 SBQT (motor) e Aço AISI 52100 SBQT (movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO

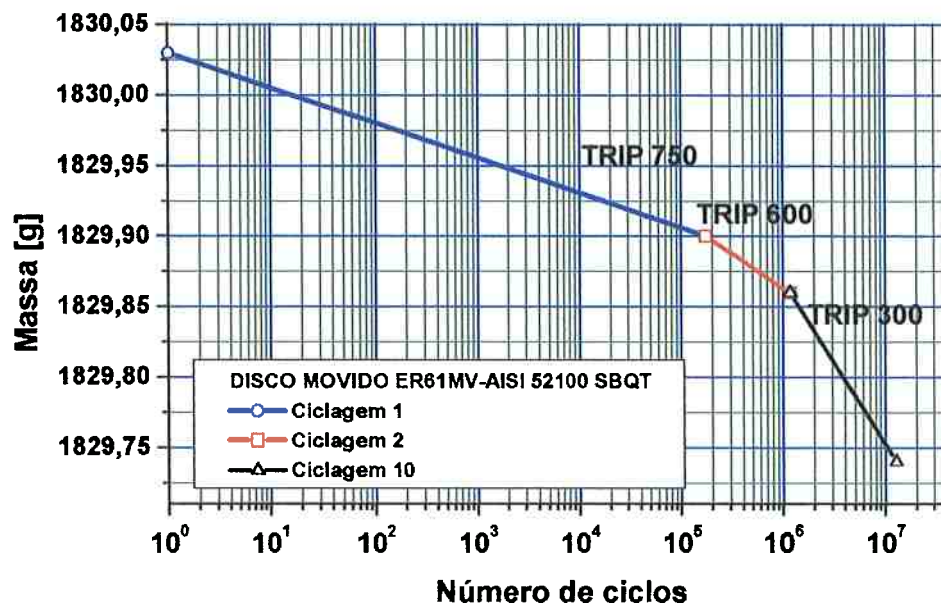
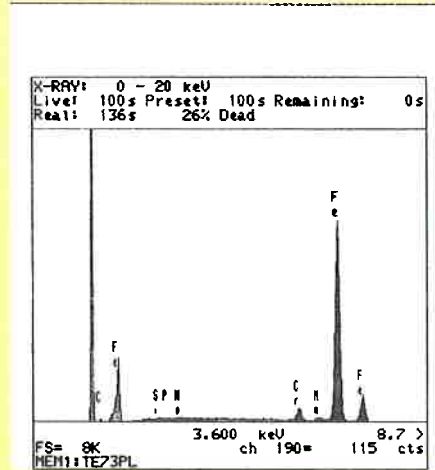
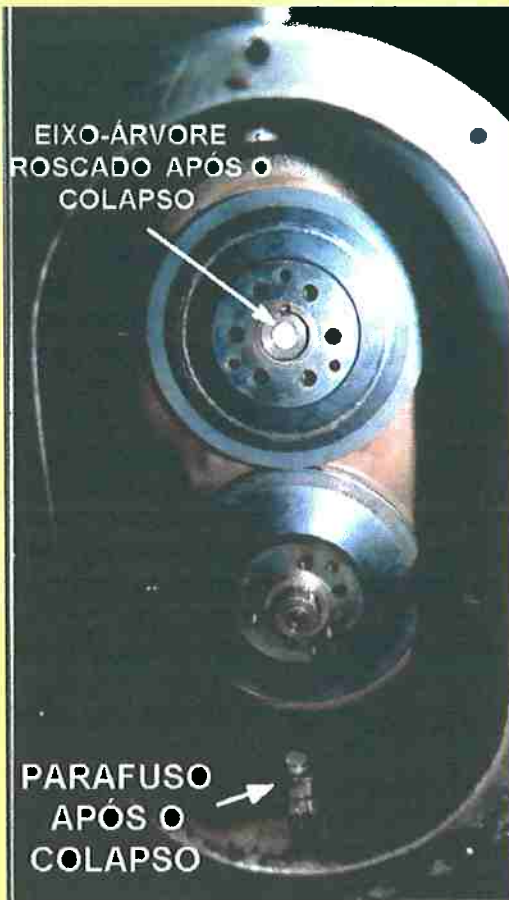


Figura 221. Evolução da perda de massa dos discos de Aço AISI 52100 SBQT (motor) e Aço AISI 52100 SBQT (movido) no ensaio ER61



Material do eixo-árvore:
: Aço EN40B (inglês)
32CrMo12 (DIN)

Composição mássica percentual :

C	Si	Mn	Cr	Mo
0,24	0,327	0,352	3,288	0,754

Fe: bal.

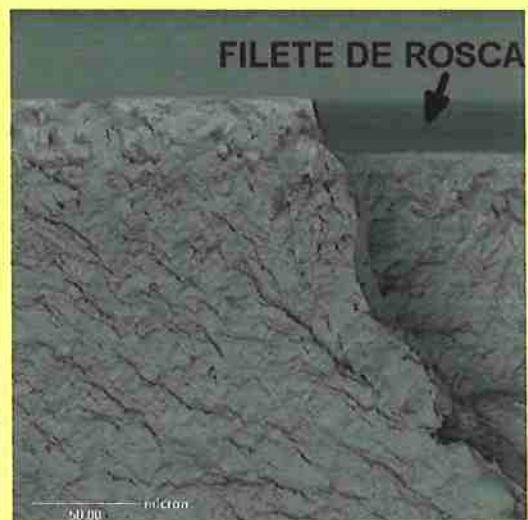
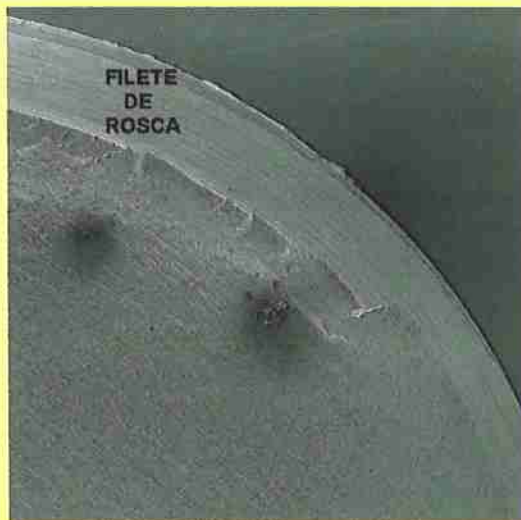
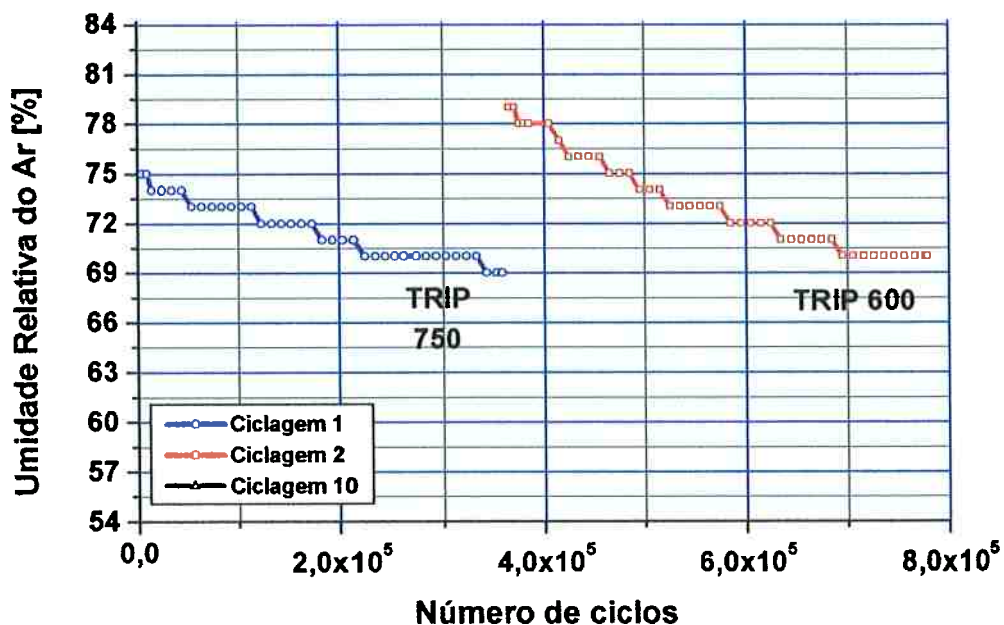


Figura 222. Colapso da extremidade roscada do eixo-árvore do sistema de fixação do disco movido aos 12,92 Megaciclos, 6.089 km do ensaio ER61

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO

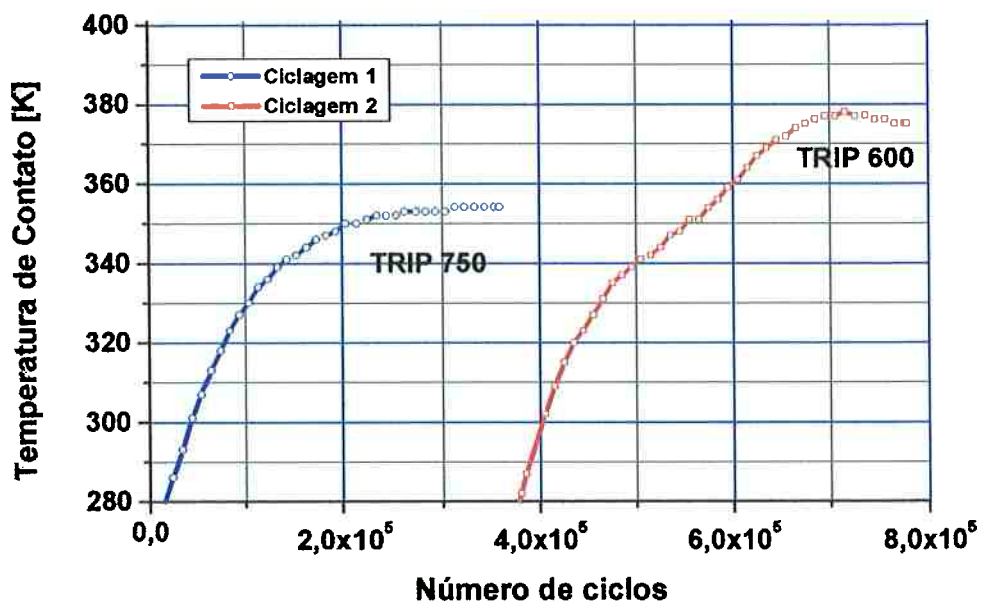
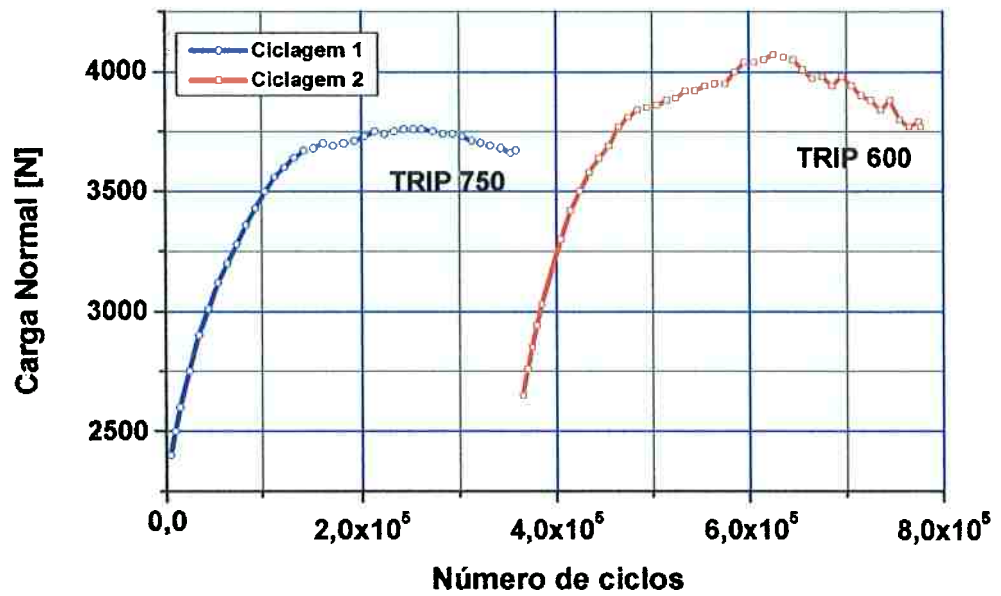


Figura 223. Evolução da umidade da sala e temperatura de contato durante o ensaio do nar de discos de Aço AISI 52100 SBOT ER62MR(motor) e ER62MV (movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO

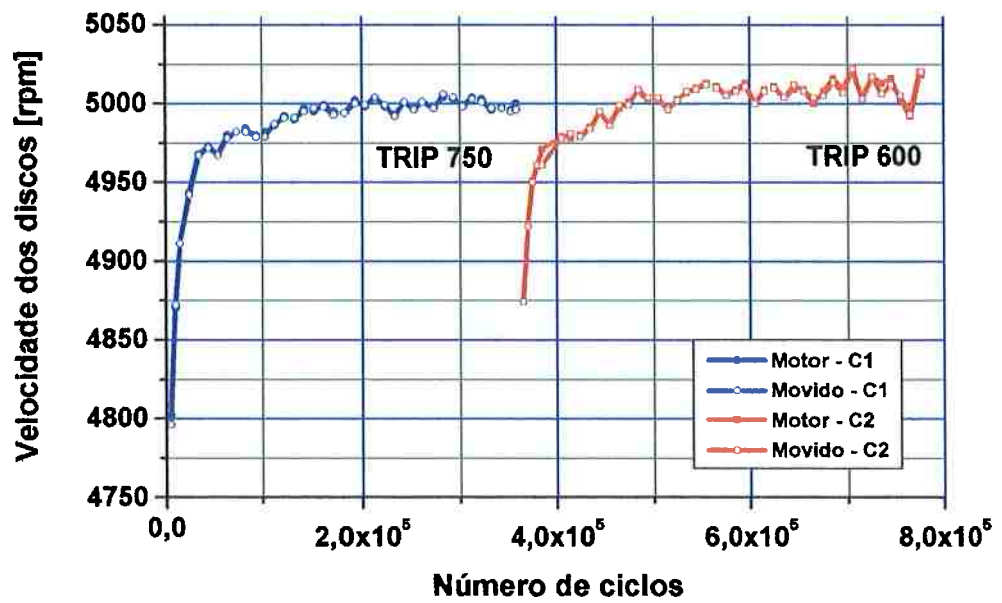
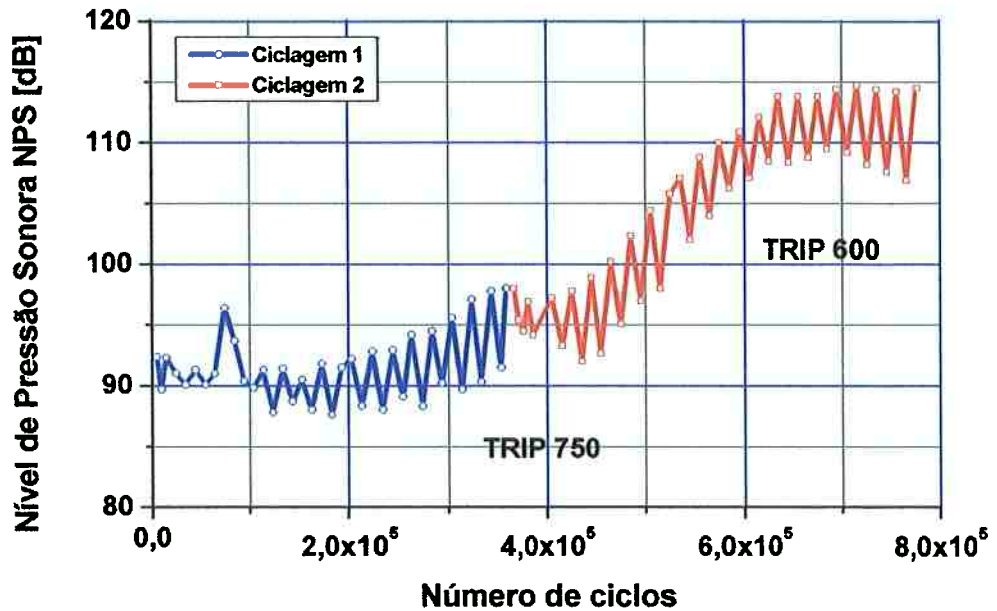


Figura 224. Evolução da carga normal de contato e velocidade durante o ensaio do par de discos de Aço AISI 52100 SBQT ER62MR(motor) e ER62MV (movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO

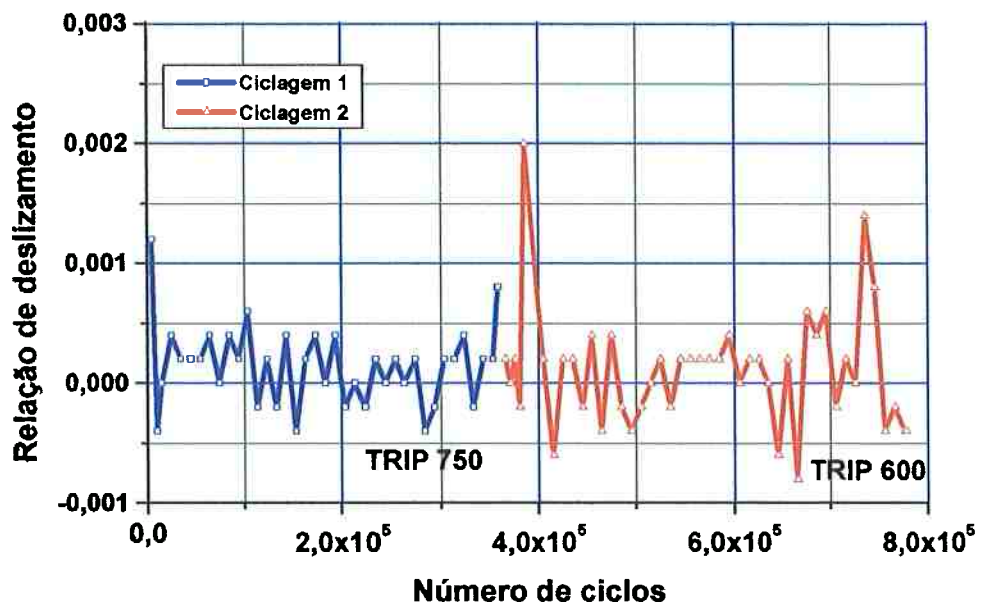
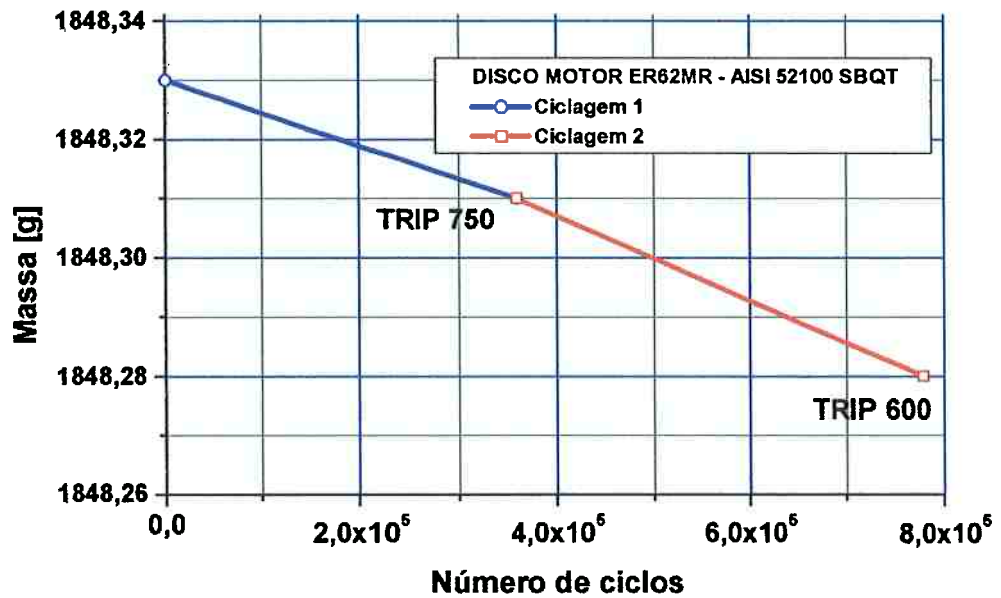


Figura 225. Evolução do Nível de Pressão Sonora e relação de deslizamento durante o ensaio do par de discos de Aço AISI 52100 SBOT ER62MR(motor) e ER62MV

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO

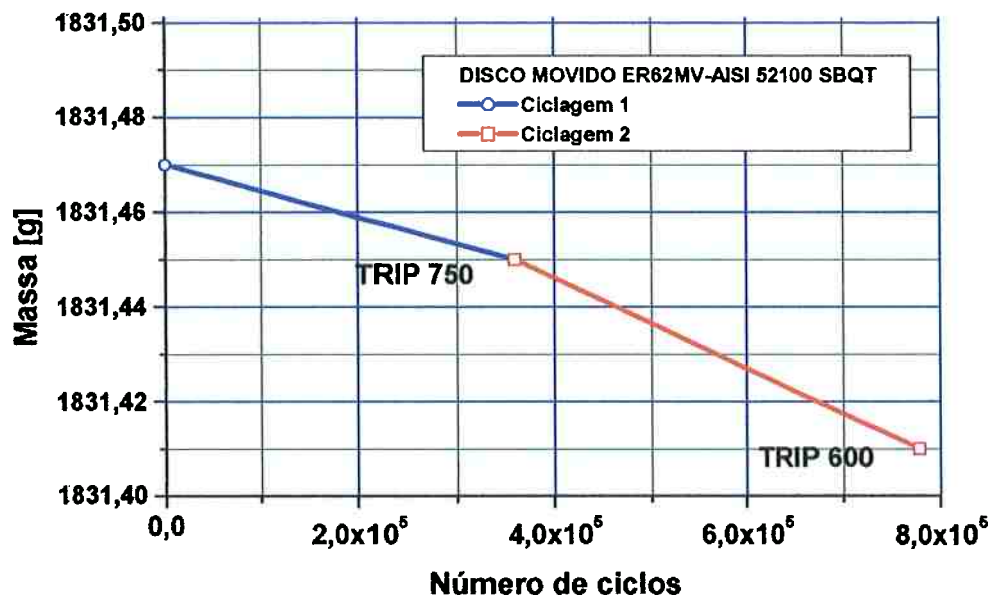
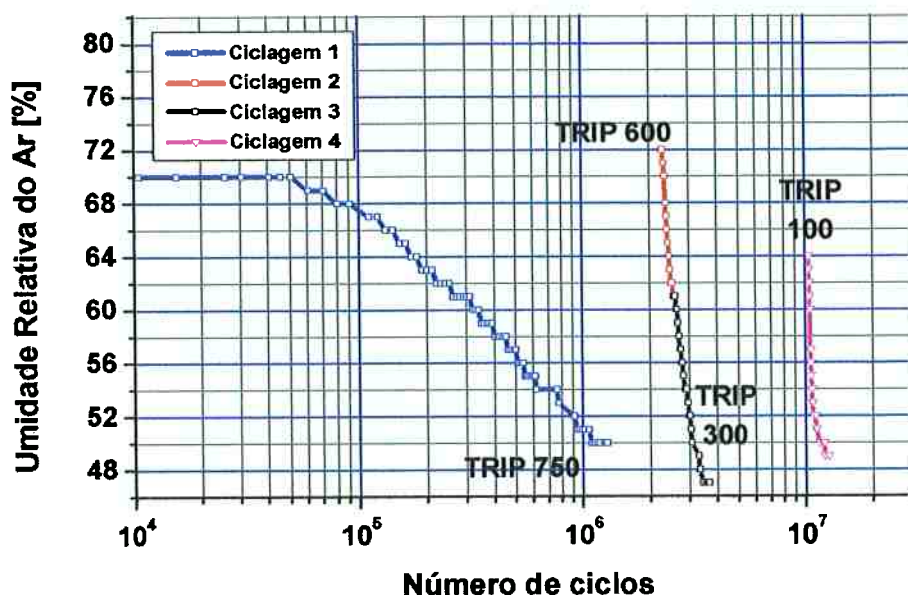


Figura 226. Evolução da perda de massa dos discos motor e movido durante o ensaio do par de discos de Aço AISI 52100 SBQT ER62MR(motor) e ER62MV (movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO

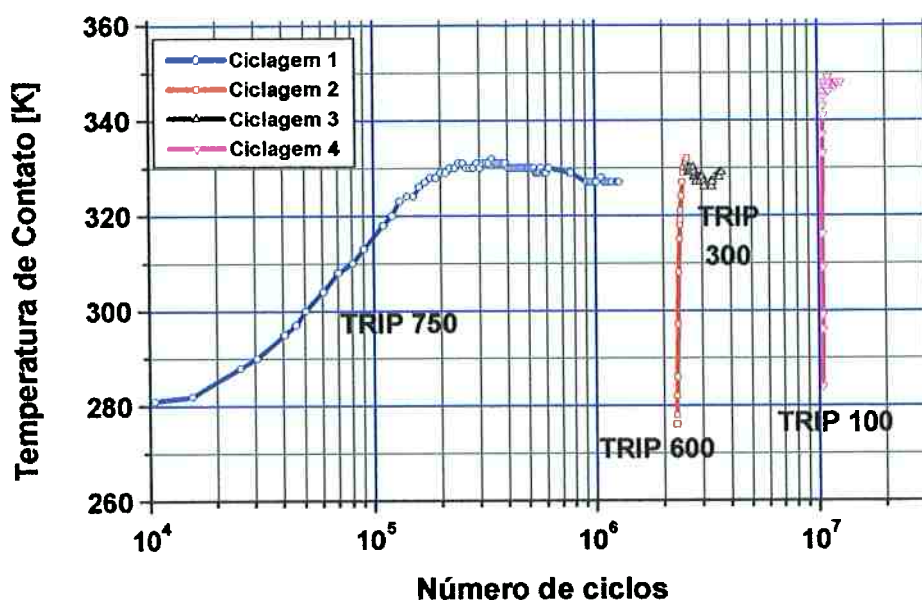
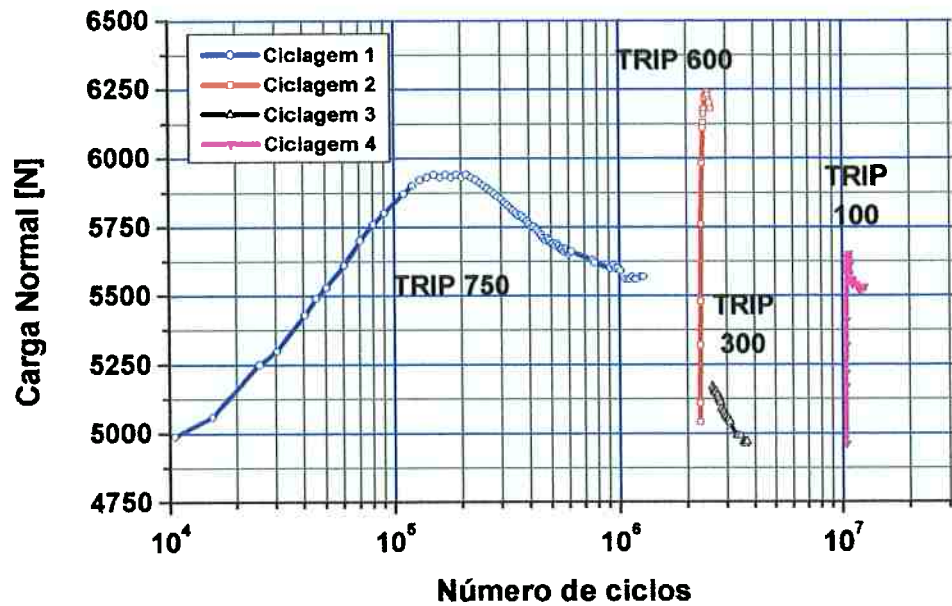


Figura 227. Evolução da umidade da sala e temperatura de contato durante o ensaio do par de discos de Aço AISI 52100 OQT-ER86MR(motor) e SBQT-ER86MV (movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO

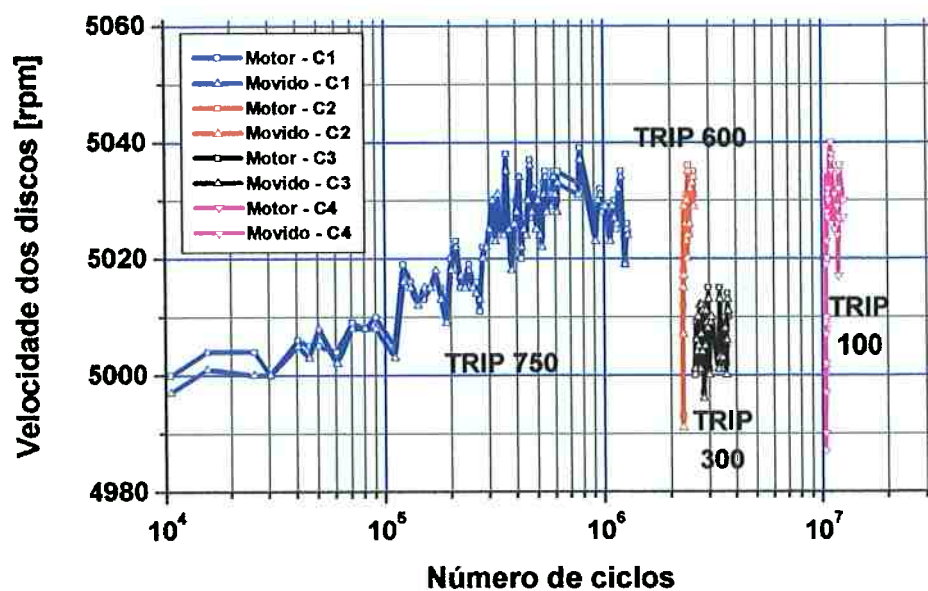
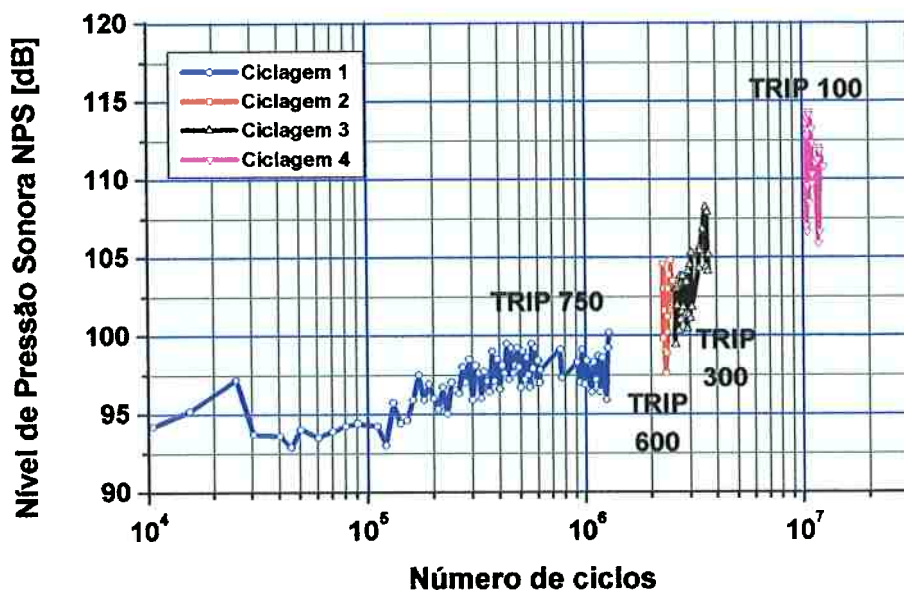


Figura 228. Evolução da carga normal de contato e velocidade durante o ensaio do par de discos de Aço AISI 52100 OQT-ER86MR(motor) e SBQT-ER86MV (movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO

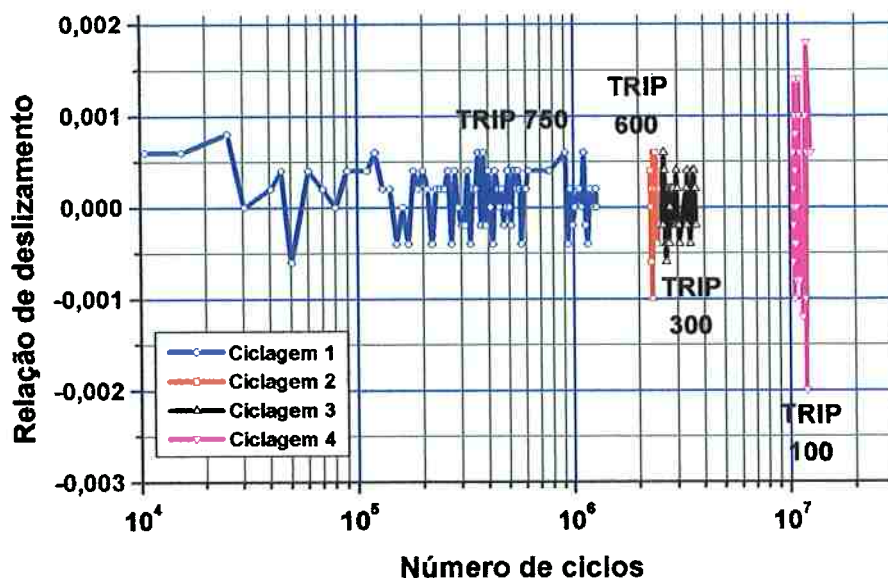
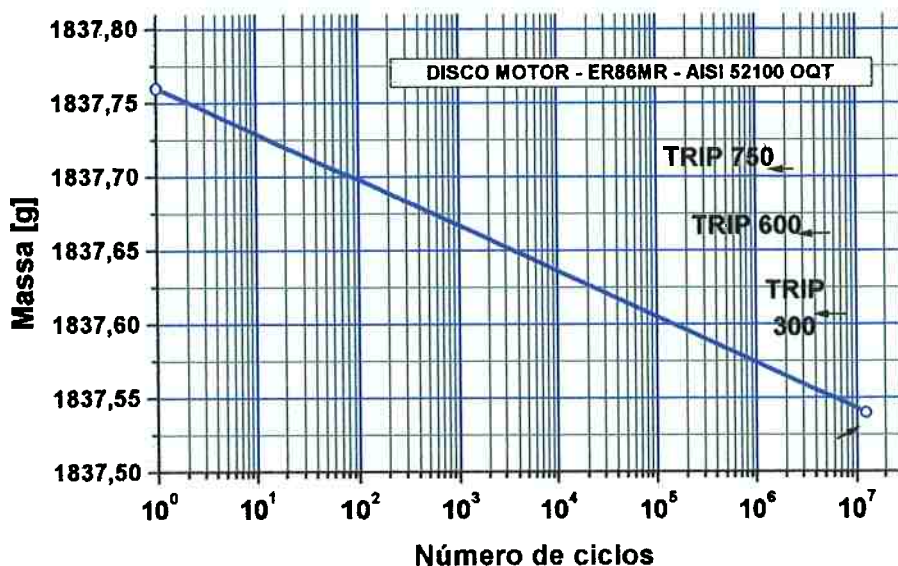


Figura 229. Evolução do Nível de Pressão Sonora e relação de deslizamento no ensaio do par de discos de Aço AISI 52100 OQT-ER86MR(motor) e SBQT-ER86MV (movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO

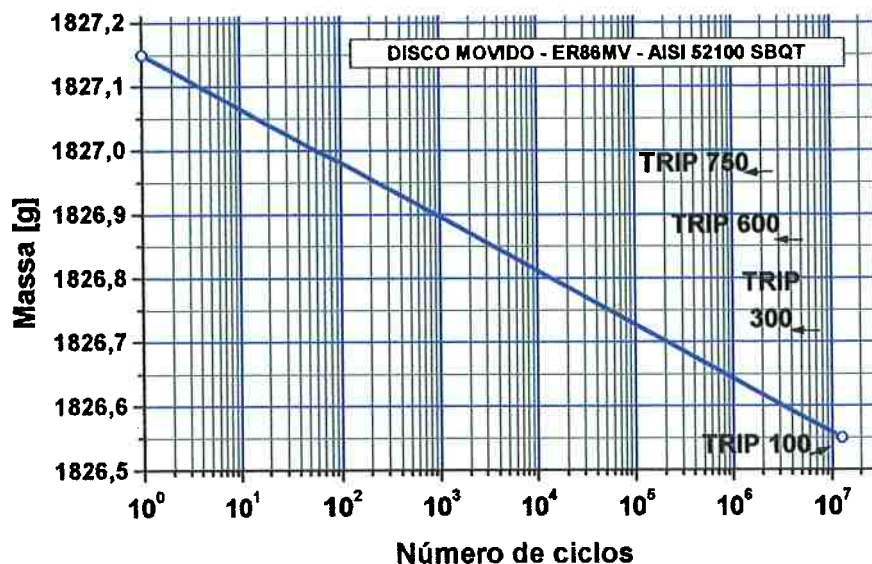


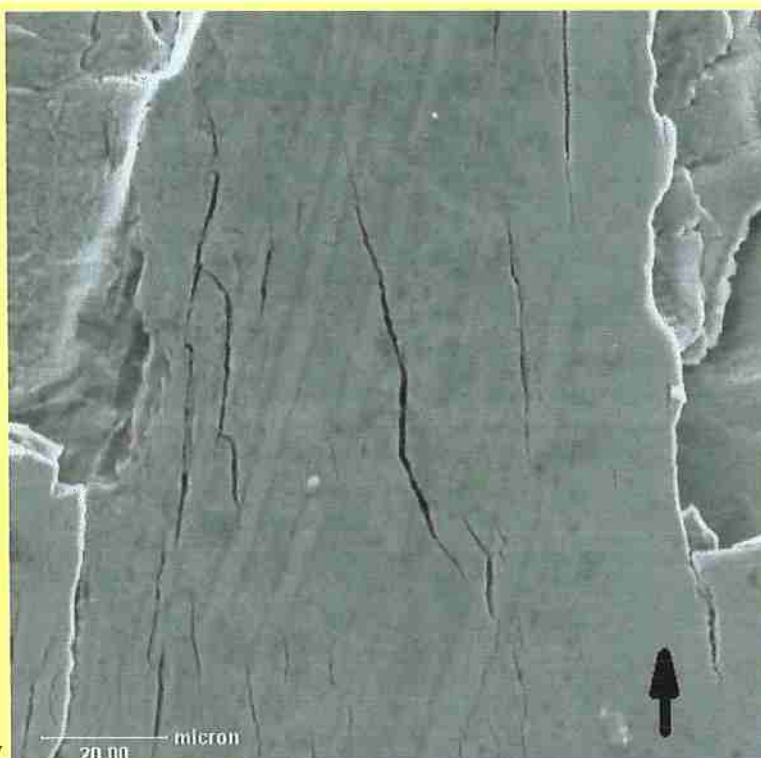
Figura 230. Evolução da perda de massa dos discos motor e movido durante o ensaio do par de discos de Aço AISI 52100 OQT-ER86MR(motor) e SBQT-ER86MV (movido)

Fotos SEM-SE
(Microscopia
Eletrônica de
Varredura, Elétrons
Secundários)

A seta indica
o sentido de
giro da pista

PISTA MOVIDA
Aço AISI 52100
SBQT

ER86MV



À esquerda da trinca
principal, direção
circunferencial, zona
limítrofe da osculação
entre as trilhas de
contato das pistas
esféricas motora e
movida.

À direita, sulcos e
microcortes retilíneos
oriundos da
retificação da pista
esférica

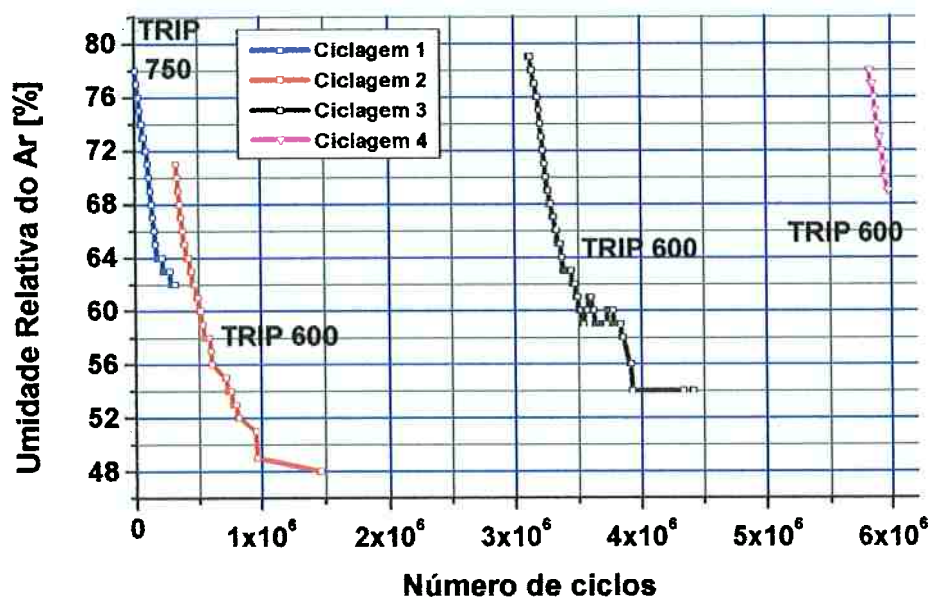
PISTA MOTORA
Aço AISI 52100
OQT

ER86MR



Figura 231. Trincas no meio da pista movida (acima) e na zona de intensificação de tensão da borda da pista motora (embaixo) - 12,6 Megaciclos, 5.931 km

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO

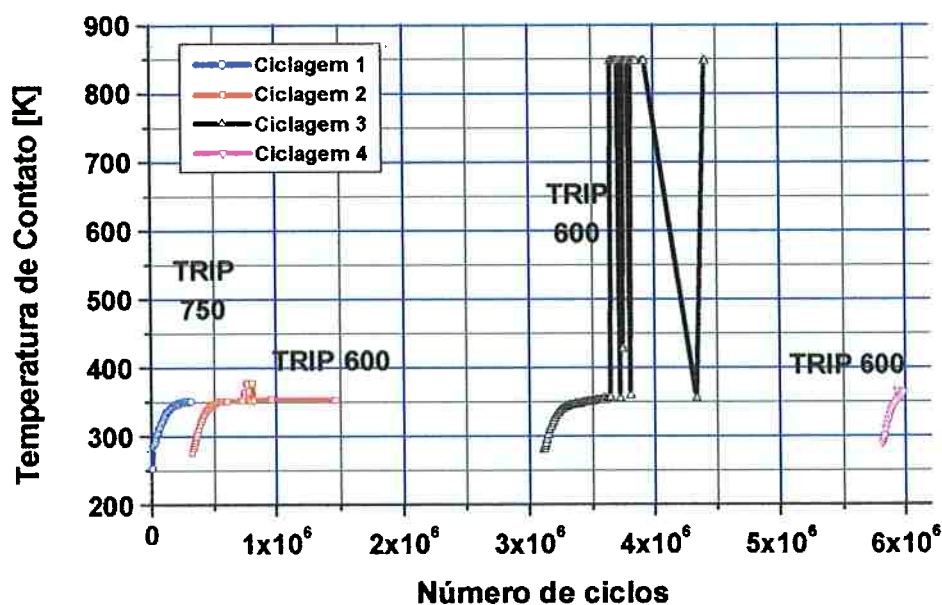
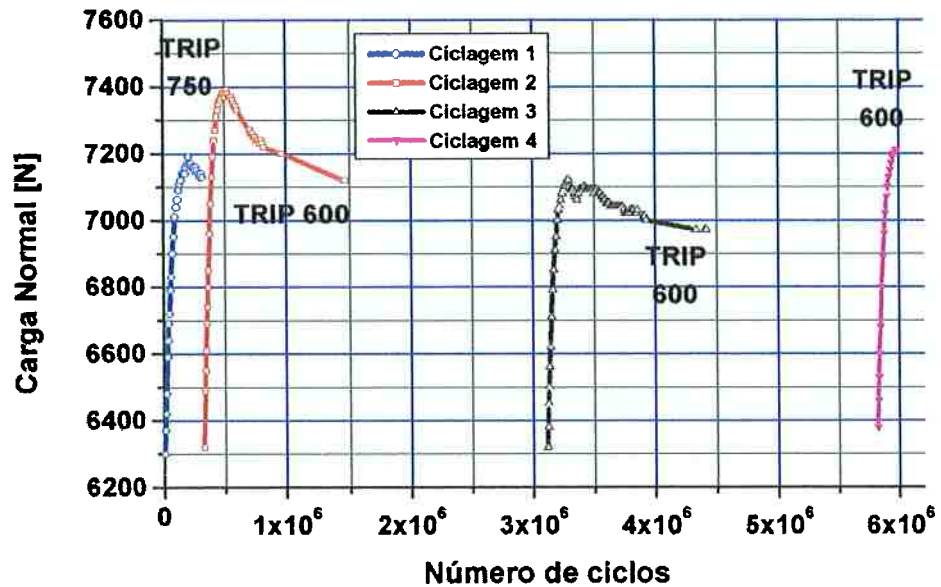


Figura 232. Evolução da umidade da sala e temperatura de contato durante o ensaio do par de discos de Aço AISI 52100 OQT ER87MR(motor) e ER87MV (movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO

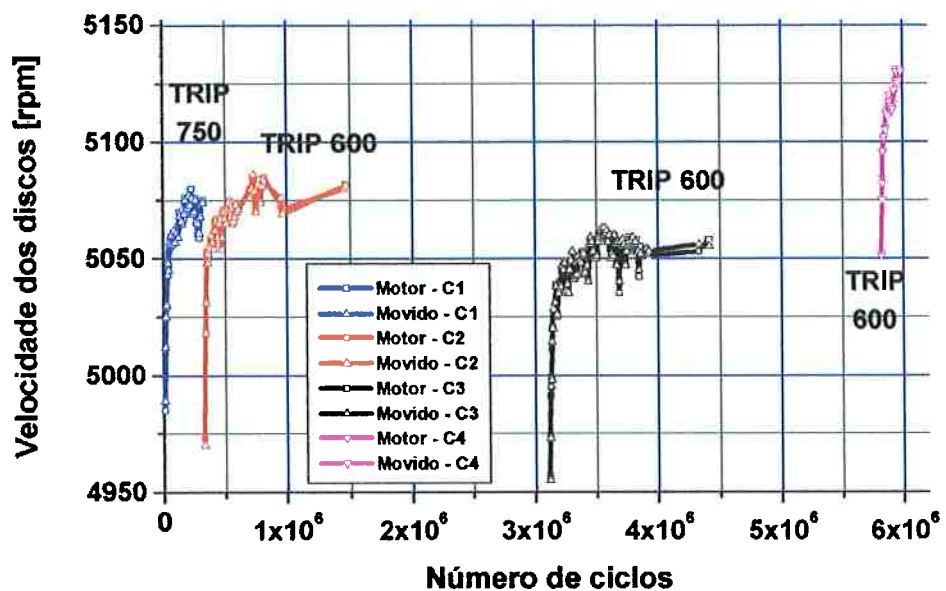
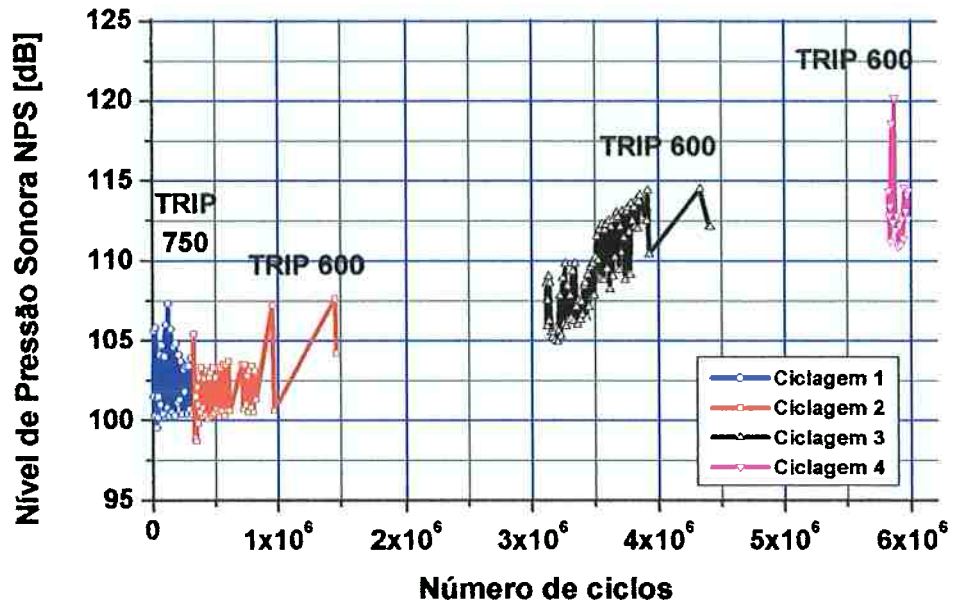


Figura 233. Evolução da carga normal de contato e velocidade durante o ensaio do par de discos de Aço AISI 52100 OQT ER87MR(motor) e ER87MV (movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO

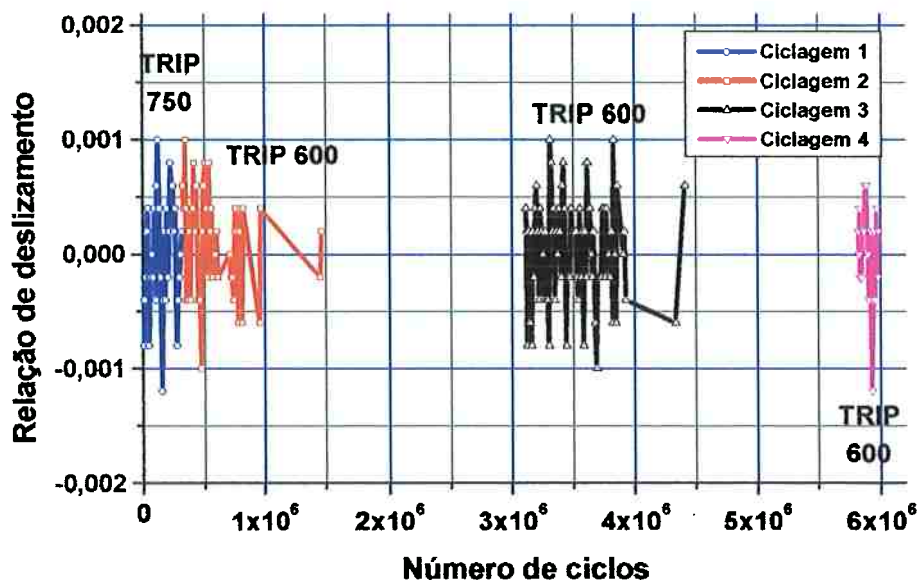
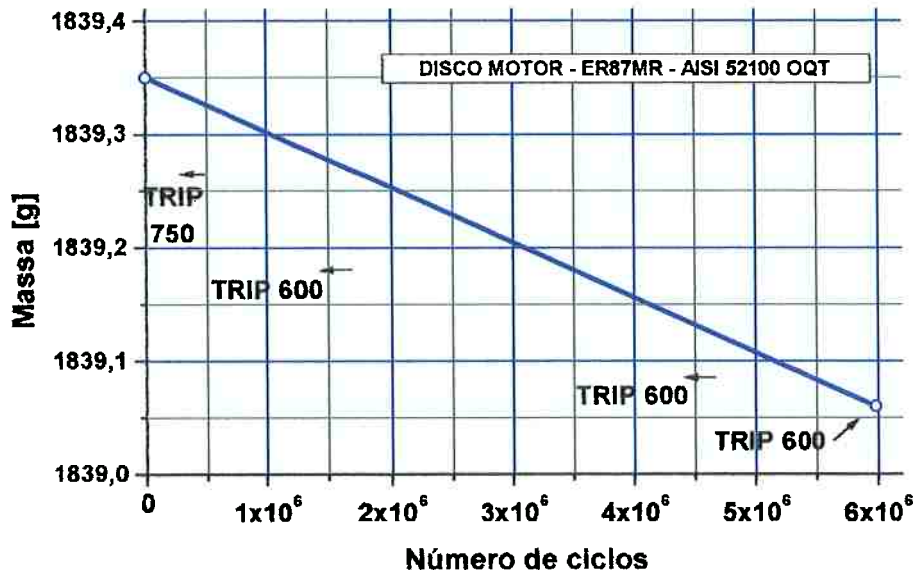


Figura 234. Evolução do Nível de Pressão Sonora e relação de deslizamento do par de discos de Aço AISI 52100 OQT ER87MR(motor) e ER87MV (movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO

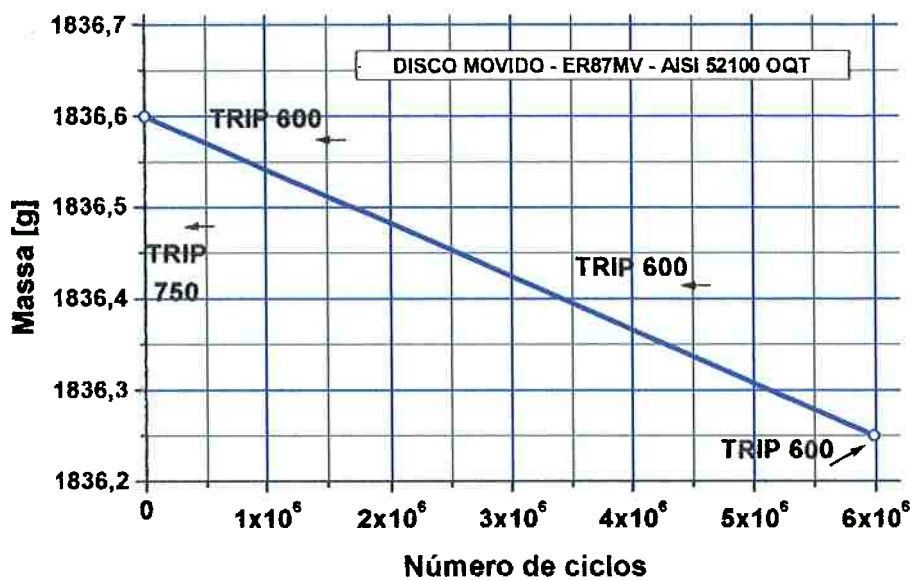
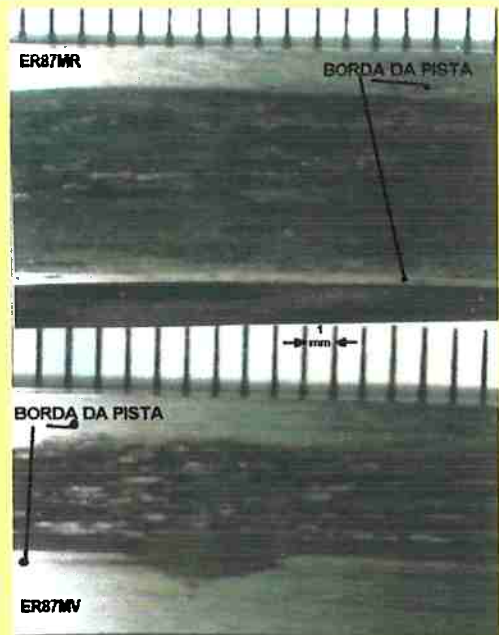


Figura 235. Evolução da perda de massa dos discos motor e movido durante o ensaio do par de discos de Aço AISI 52100 OQT ER87MR(motor) e ER87MV (movido)

**Disco Motor de Aço
AISI 52100- OQT
ER87MR**

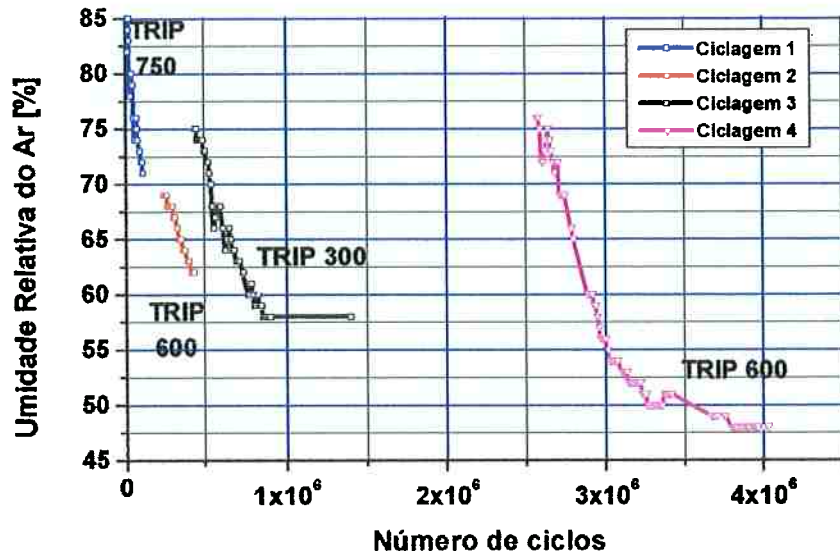
**Disco Movido de Aço
AISI 52100 – OQT
ER87MV**



ER87MV-OQT

Figura 236. Trilhas de contato (“*footprints*”) do par de discos ER87, com vestígios de aquecimento excessivo e desgaste por corrugação (poligonização) na pista movida ER87MV aos 5,98 Megaciclos, 2.820 km

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO

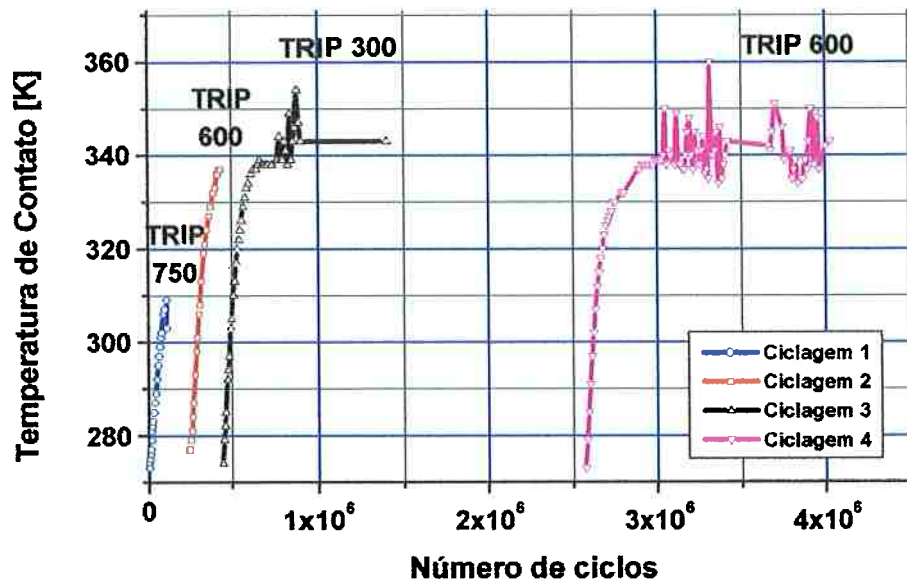
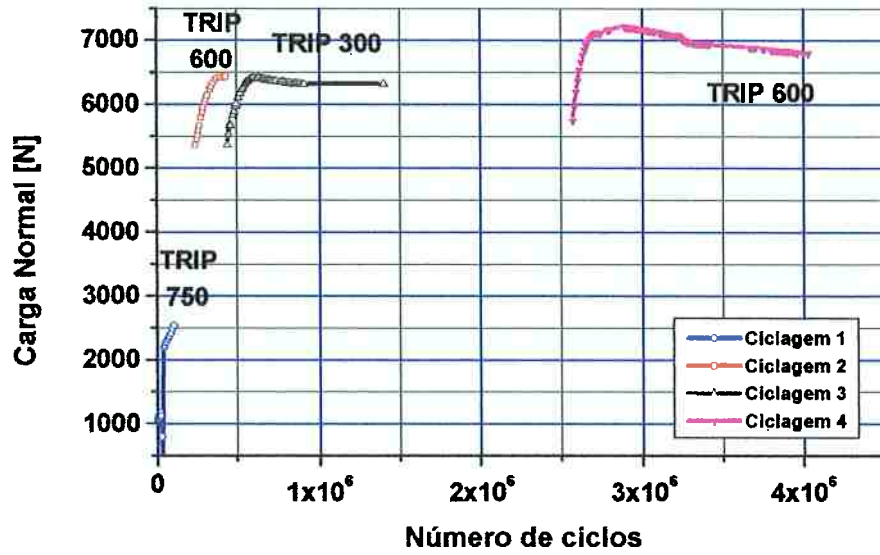


Figura 237. Evolução da umidade da sala e temperatura de contato durante o ensaio do par de discos de Aço AISI 52100 SBQT ER88MR(motor) e ER88MV (movido, entalhado)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO

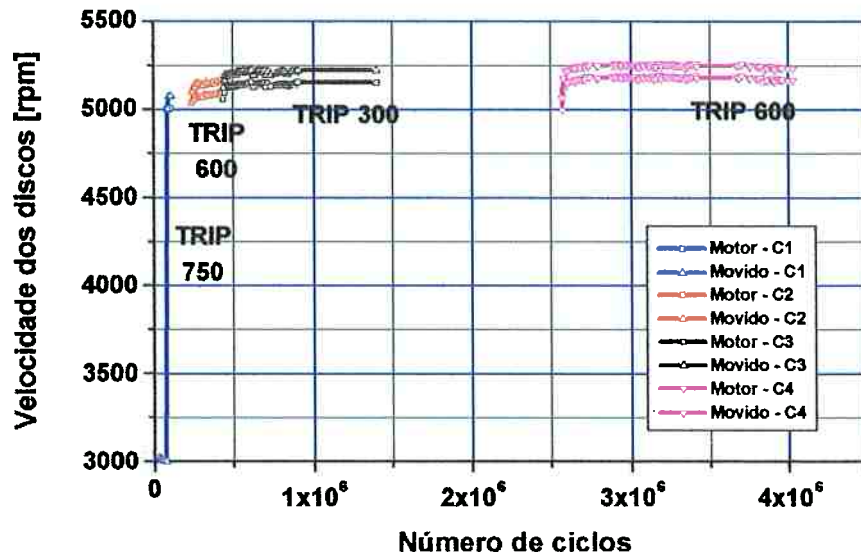
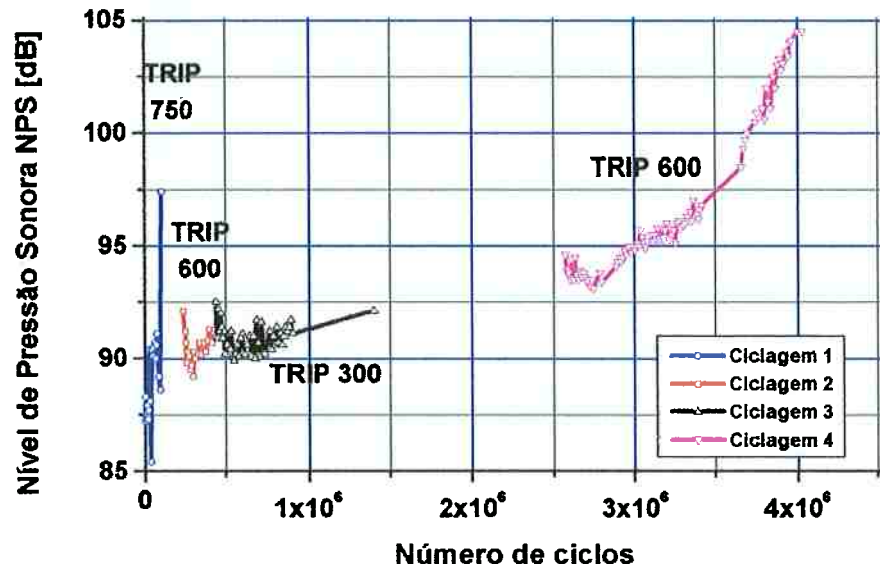


Figura 238. Evolução da carga normal de contato e velocidade durante o ensaio do par de discos de Aço AISI 52100 SBQT ER88MR(motor) e ER88MV (movido, entalhado)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO

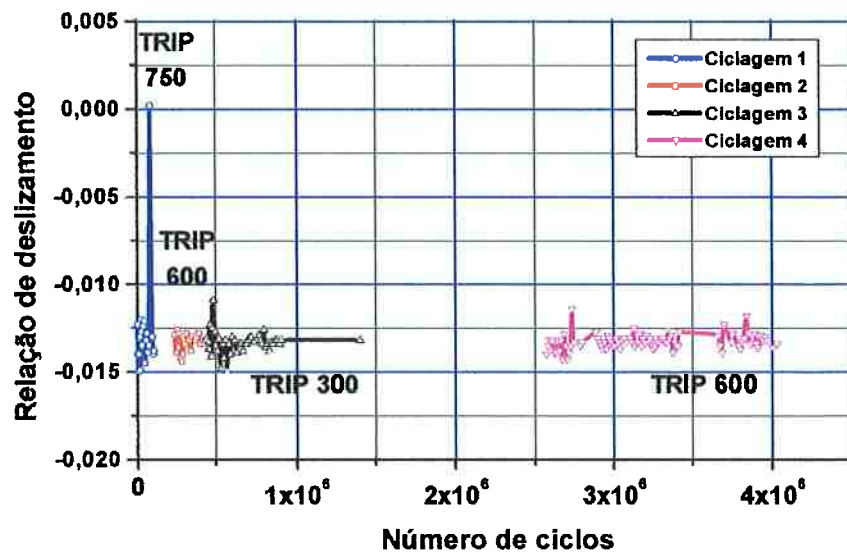
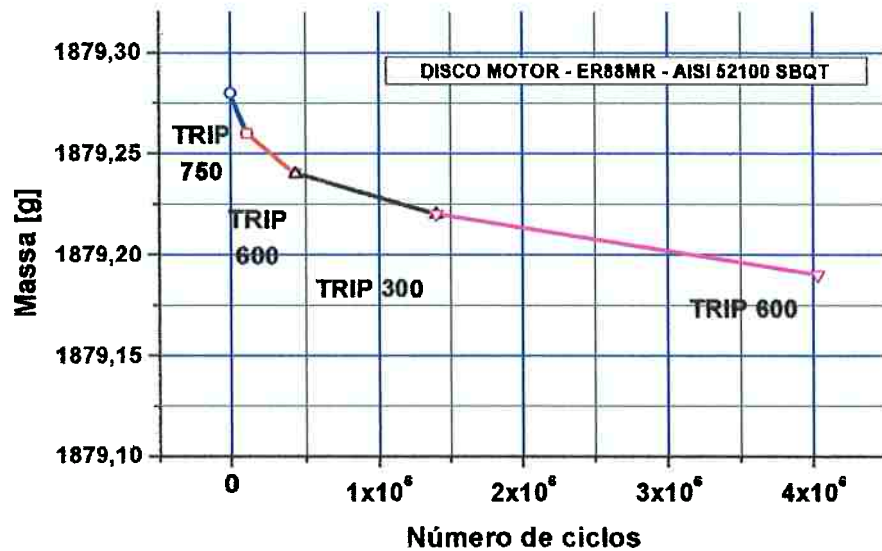


Figura 239. Evolução do Nível de Pressão Sonora e relação de deslizamento do par de discos de Aço AISI 52100 SBQT ER88MR(motor) e ER88MV (movido, entalhado)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO

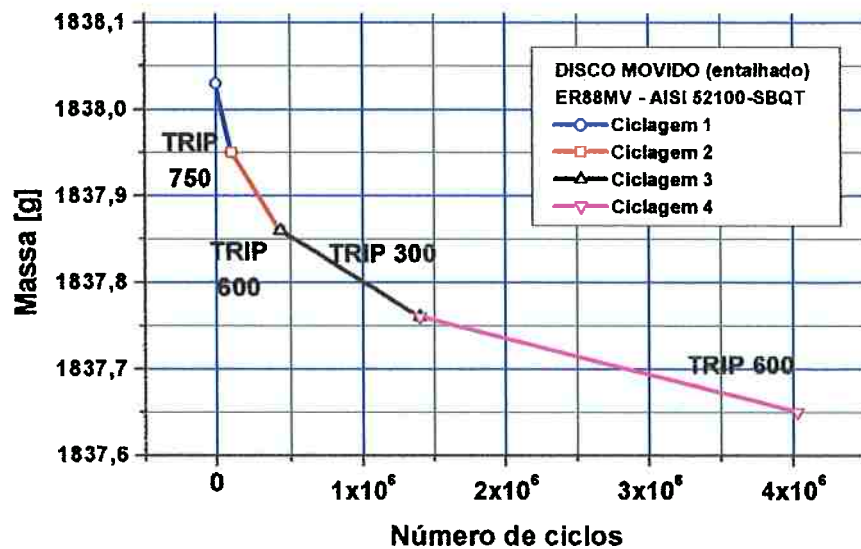


Figura 240. Evolução da perda de massa dos discos motor e movido durante o ensaio do par de discos de Aço AISI 52100 SBQT ER88MR(motor) e ER88MV (movido, entalhado)

Entalhe axial
e trilha de
contato
na pista
movida de
rolamento de
aço AISI
52100 SBQT,
após 4,03
Megaciclos
(ER88MV),
observados
pela face
anterior do
disco



Idem, vistas
pela face
posterior,
onde se vêem
também furos
de
balanceamento
do disco

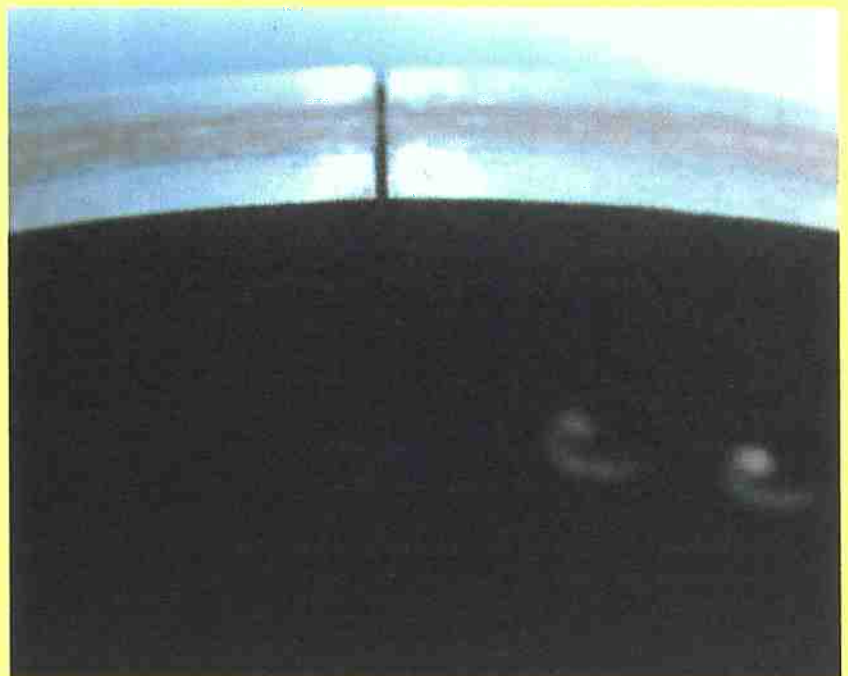
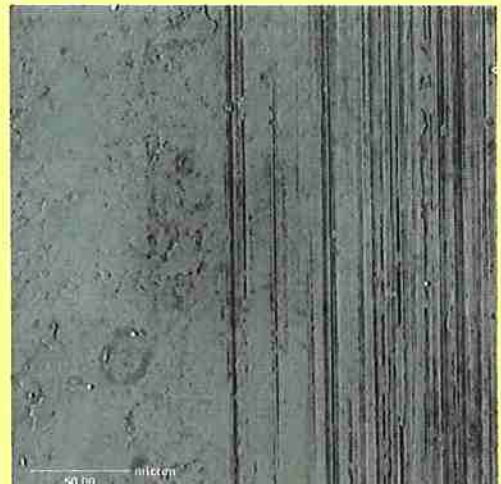


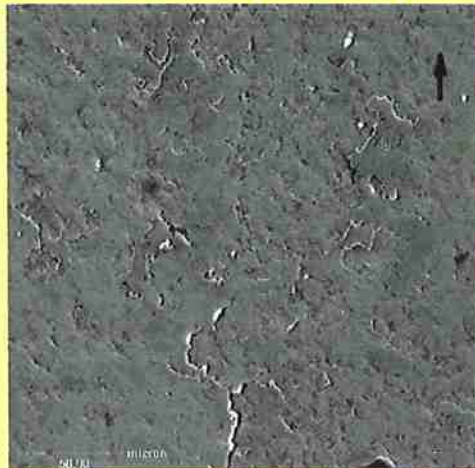
Figura 241. Visualização da pista ensaiada e do entalhe (espessura 308 μm , 1,00 mm de profundidade) usinado por eletroerosão no disco de Aço AISI 52100 SBQT ER88MV (movido), 4,03 Megaciclos, 1.912 km (a direita, vêm-se dois furos, executados para balanceamento do disco)



88MR Borda esquerda da pista



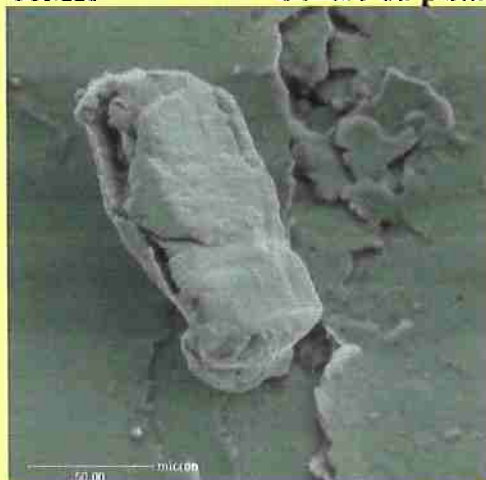
88MR Borda direita da pista



88MR Centro da pista



Microcavacos do ensaio ER88



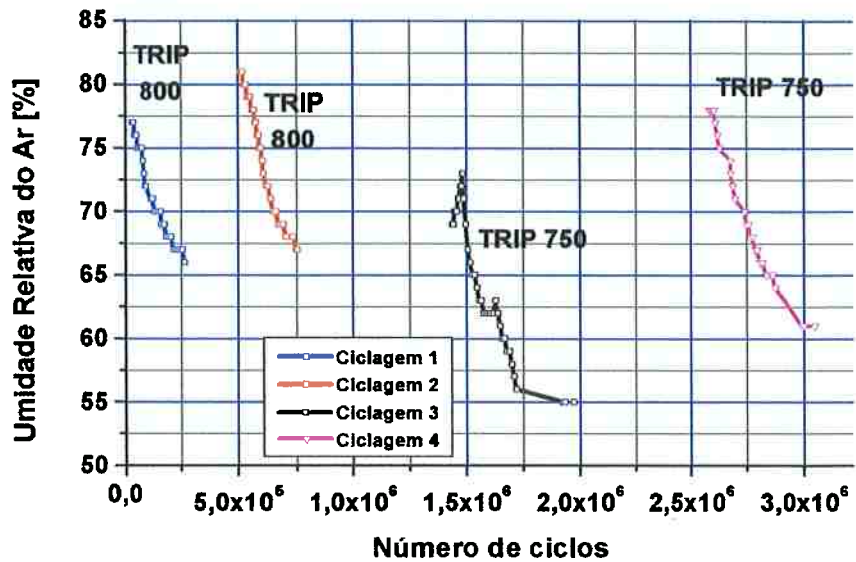
88MV Centro da pista



88MV Centro da pista

Figura 242. Fotos SE-SEM das pistas dos discos motor (MR) e movido (MV) ER88MR(motor) e ER88MV (movido, entalhado)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO

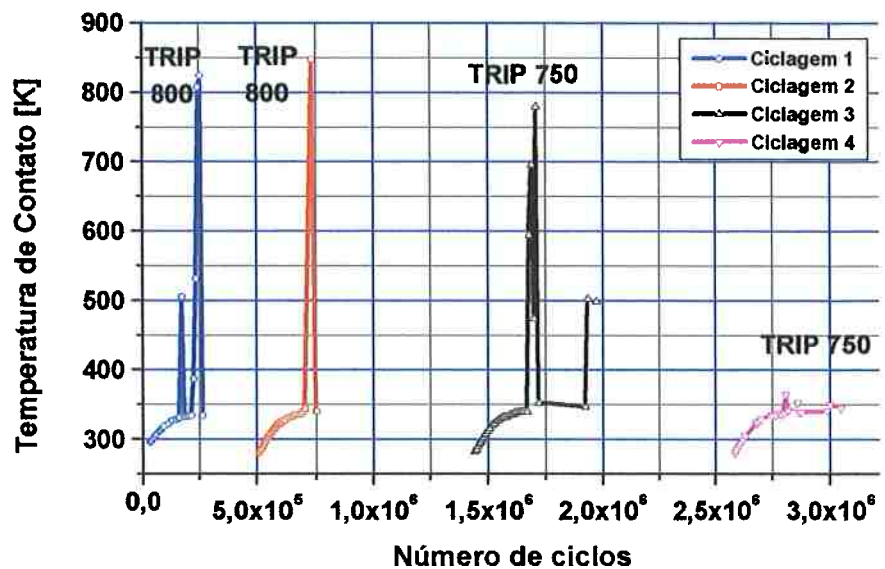
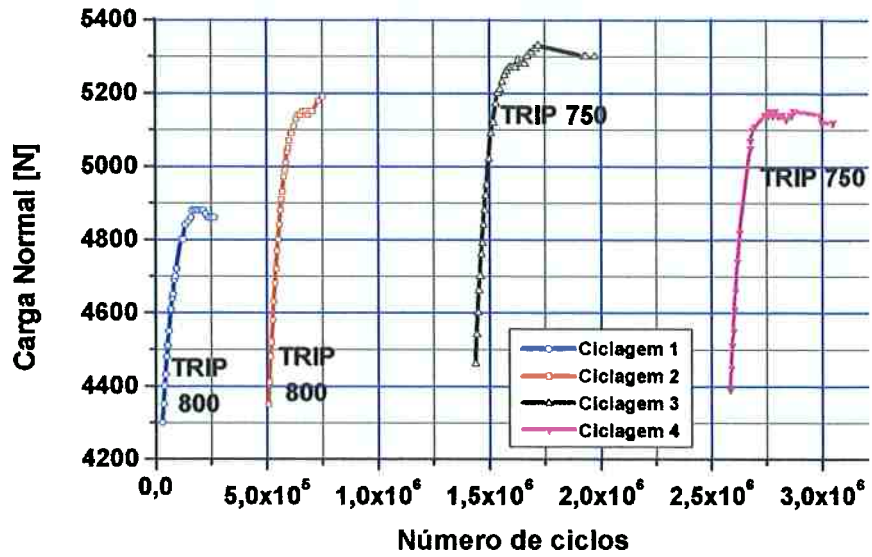


Figura 243. Evolução da umidade da sala e temperatura de contato no ensaio do par de discos de Aço AISI 52100 SBQT ER21MR(motor) e Aço AISI 52100 OQT ER21MV (movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO

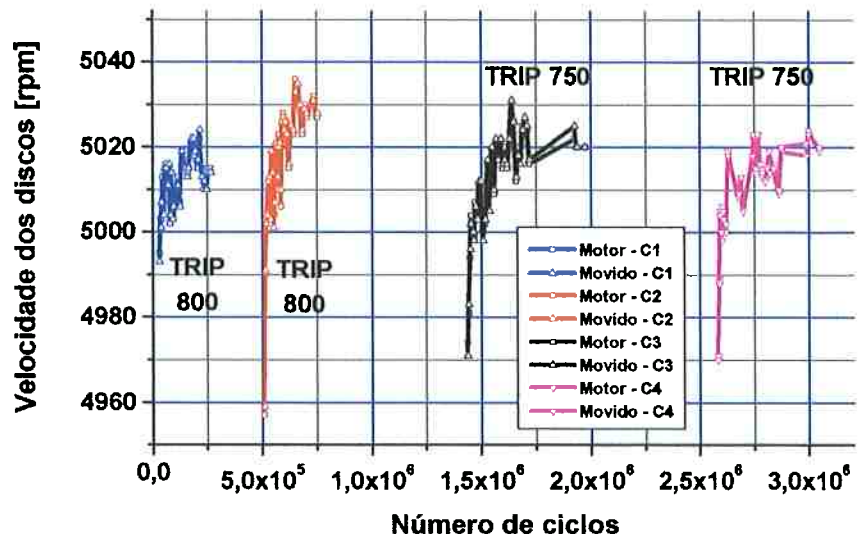
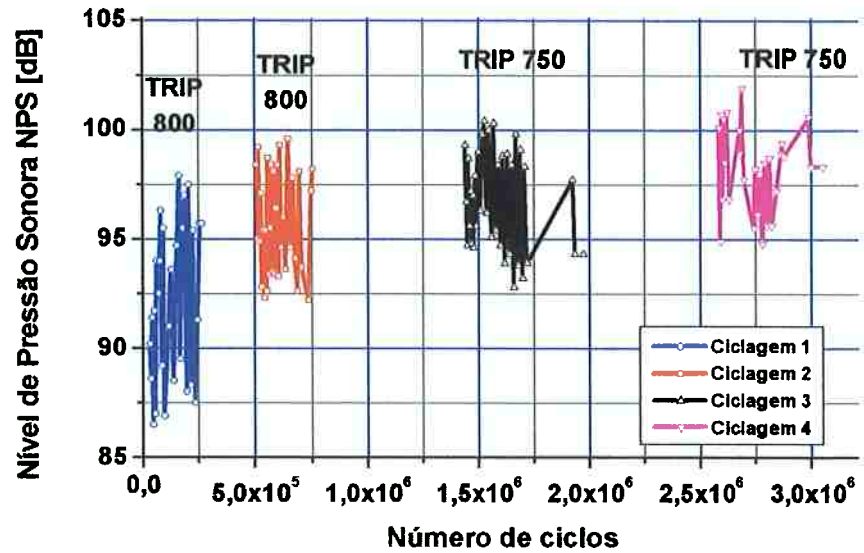


Figura 244. Evolução da carga normal de contato e velocidade durante o ensaio do par de discos de Aço AISI 52100 SBQT ER21MR(motor) e Aço AISI 52100 OQT ER21MV (movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO

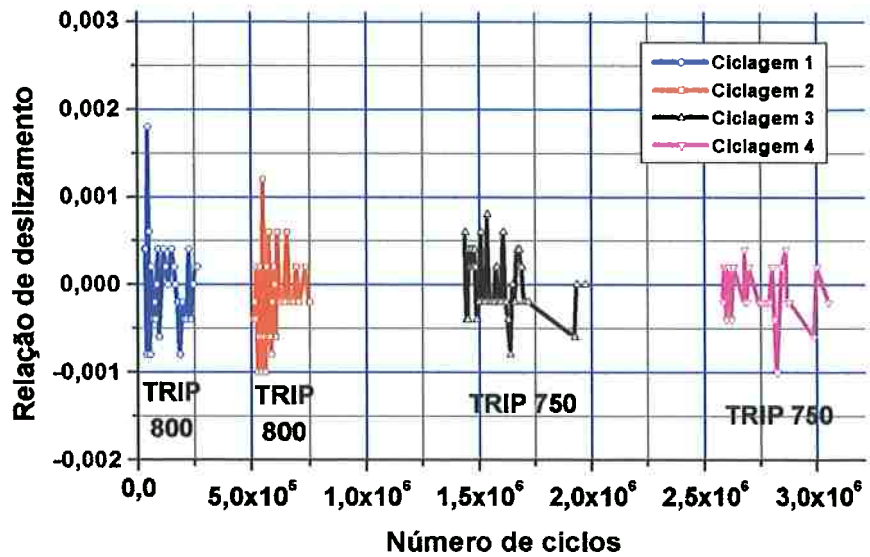


Figura 245. Evolução do Nível de Pressão Sonora e relação de deslizamento do par de discos de Aço AISI 52100 SBQT ER21MR(motor) e Aço AISI 52100 OQT ER21MV (movido)

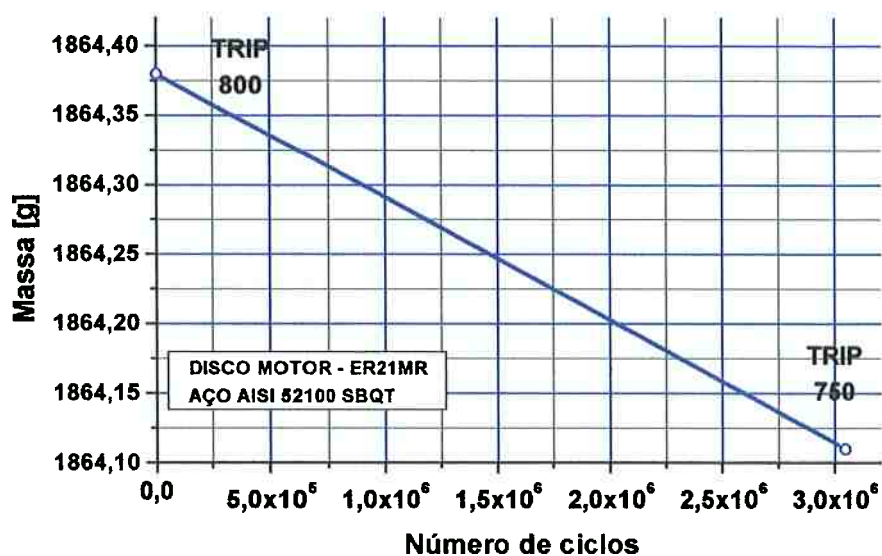
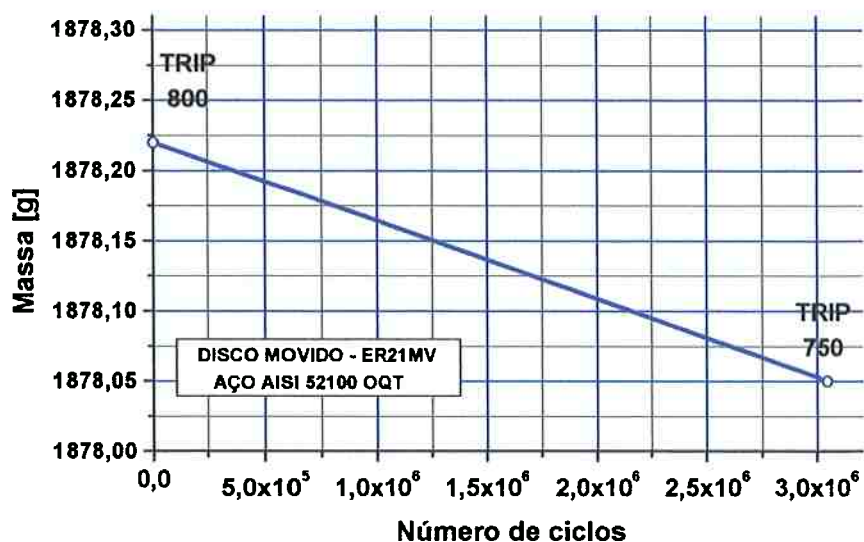
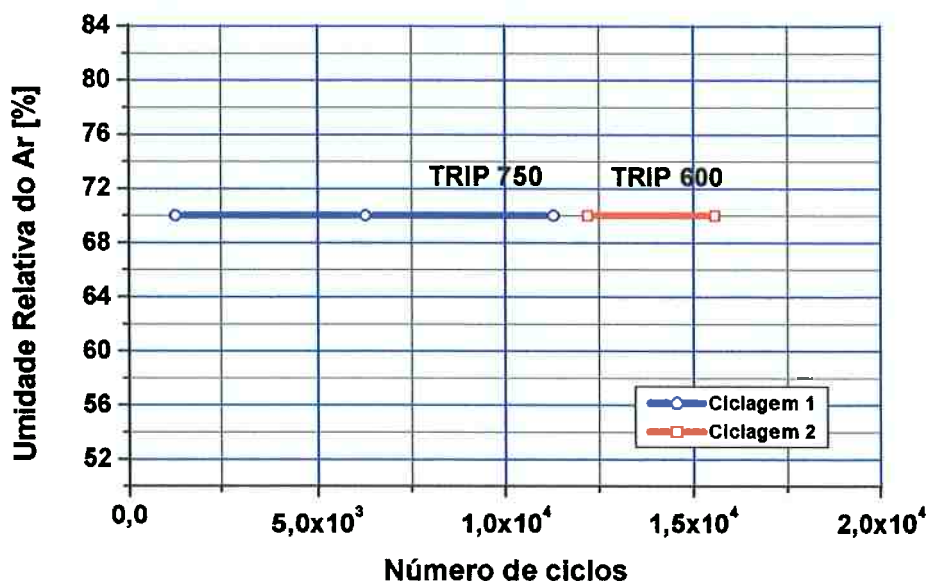
ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO**ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO**

Figura 246. Evolução da perda de massa dos discos motor e movido no ensaio do par de discos de Aço AISI 52100 SBQT ER21MR(motor) e Aço AISI 52100 OQT ER21MV (movido)



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO
AÇO AISI 52100 SBQT - AISI 1045 nitretado a plasma



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO
AÇO AISI 52100 SBQT - AISI 1045 nitretado a plasma

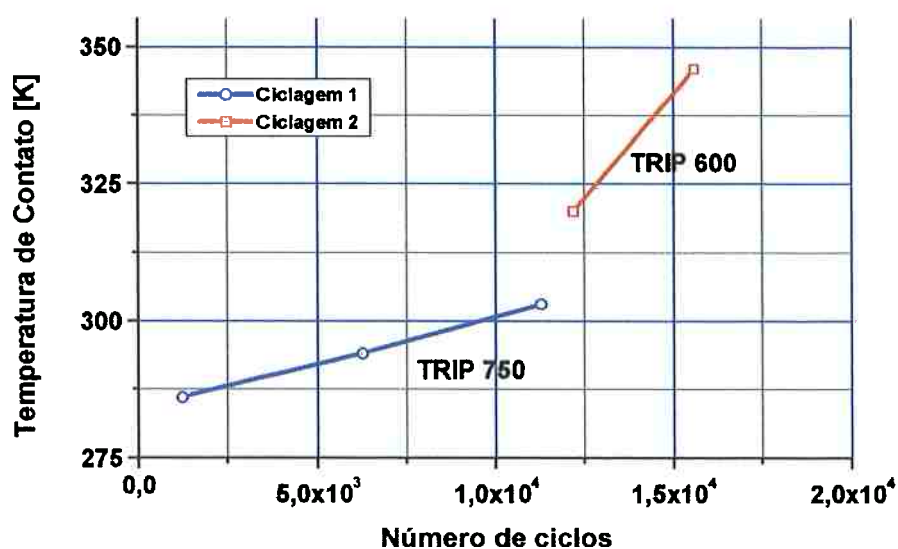
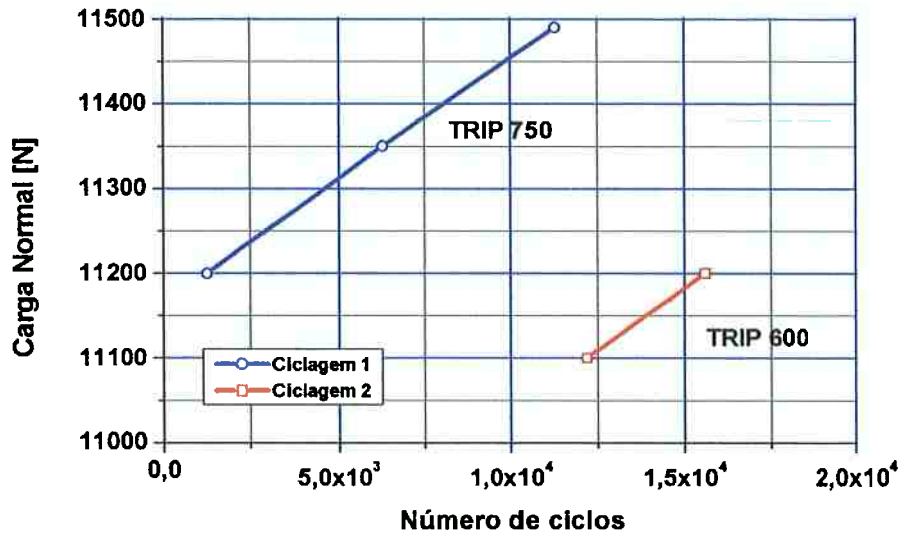


Figura 248. Evolução da umidade da sala e temperatura de contato no ensaio do par de discos de Aço AISI 52100 SBQT S09MR(motor) e Aço AISI 1045 nitretado a plasma, RN2 (movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO
AÇO AISI 52100 SBQT - AISI 1045 nitretado a plasma



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO
AÇO AISI 52100 SBQT - AISI 1045 nitretado a plasma

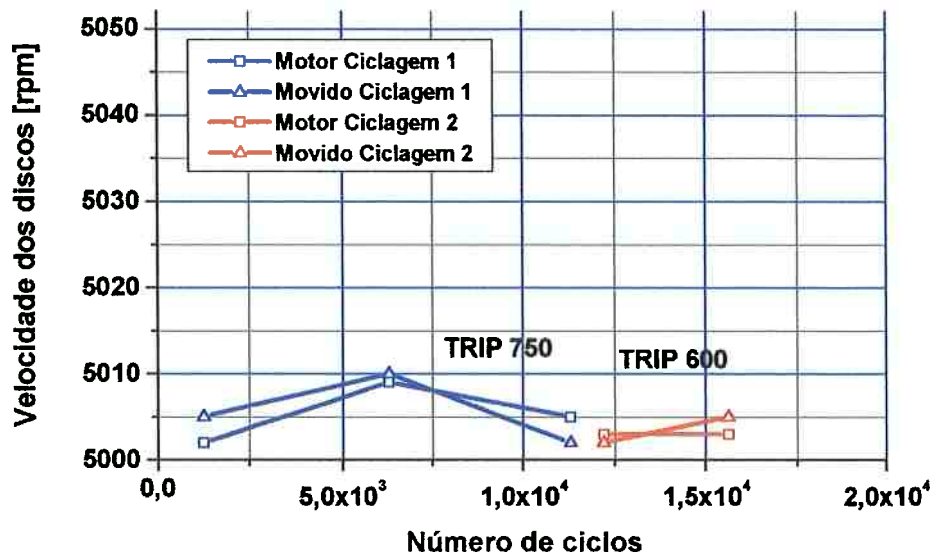
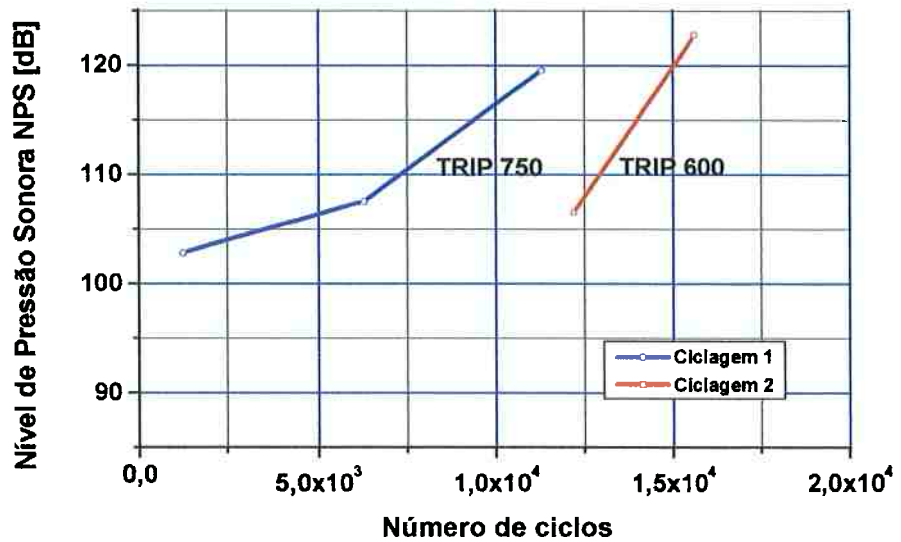


Figura 249. Evolução da carga normal de contato e velocidade durante o ensaio do par de discos de Aço AISI 52100 SBQT S09MR(motor) e Aço AISI 1045 nitretado a plasma, RN2 (movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO
AÇO AISI 52100 SBQT - AISI 1045 nitretado a plasma



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO
AÇO AISI 52100 SBQT - AISI 1045 nitretado a plasma

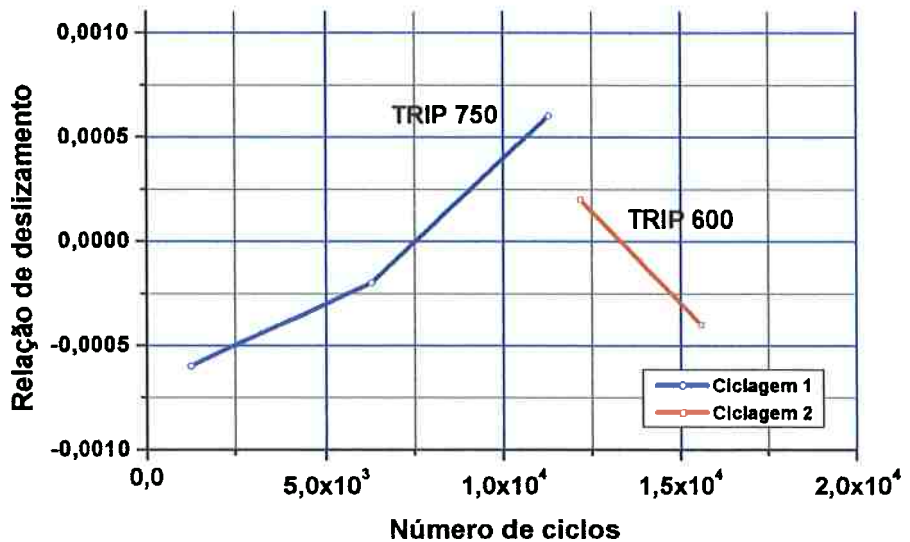
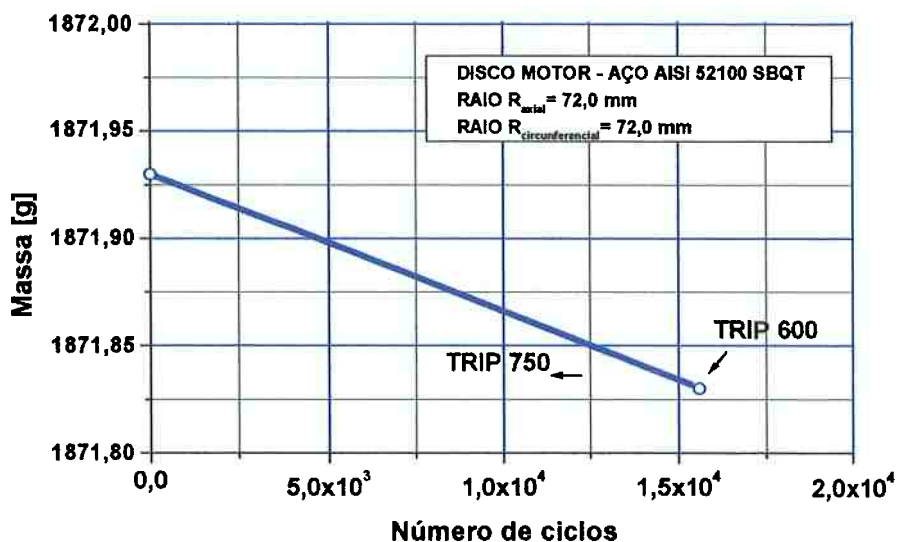


Figura 250. Evolução do Nível de Pressão Sonora e relação de deslizamento do par de discos de Aço AISI 52100 SBQT S09MR(motor) e Aço AISI 1045 nitretado a plasma RN2 (movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO
AÇO AISI 52100 SBQT - AISI 1045 nitretado a plasma



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO
AÇO AISI 52100 SBQT - AISI 1045 nitretado a plasma

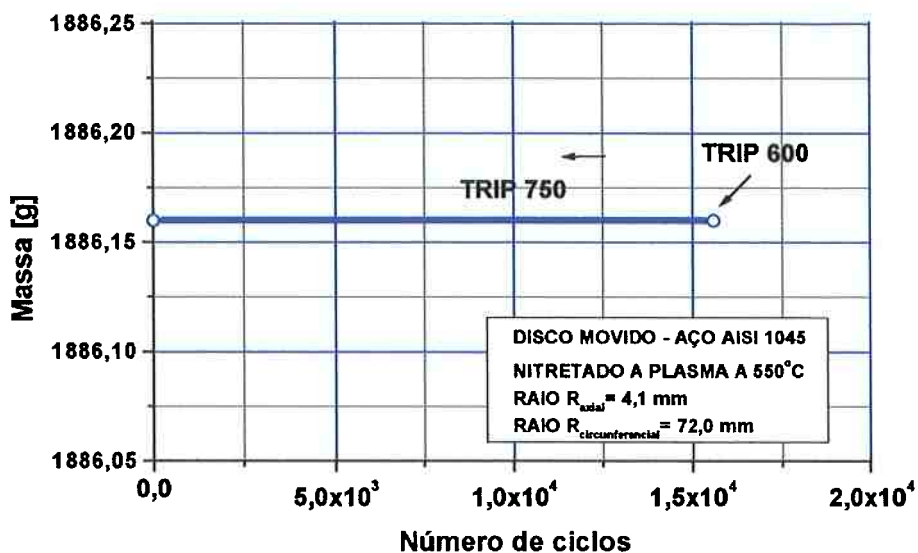
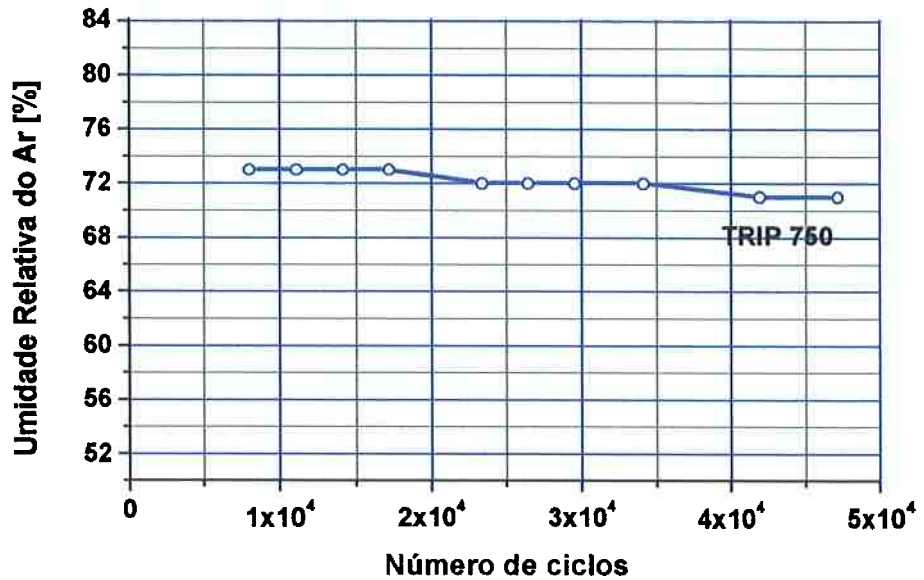


Figura 251. Evolução da perda de massa dos discos motor e movido no ensaio do par de discos de Aço AISI 52100 SBQT S09MR(motor) e Aço AISI 1045 nitretado a plasma, RN2 (movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO
AÇO AISI 52100 SBQT - AISI 1045 nitretado a plasma



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO
AÇO AISI 52100 SBQT - AISI 1045 nitretado a plasma

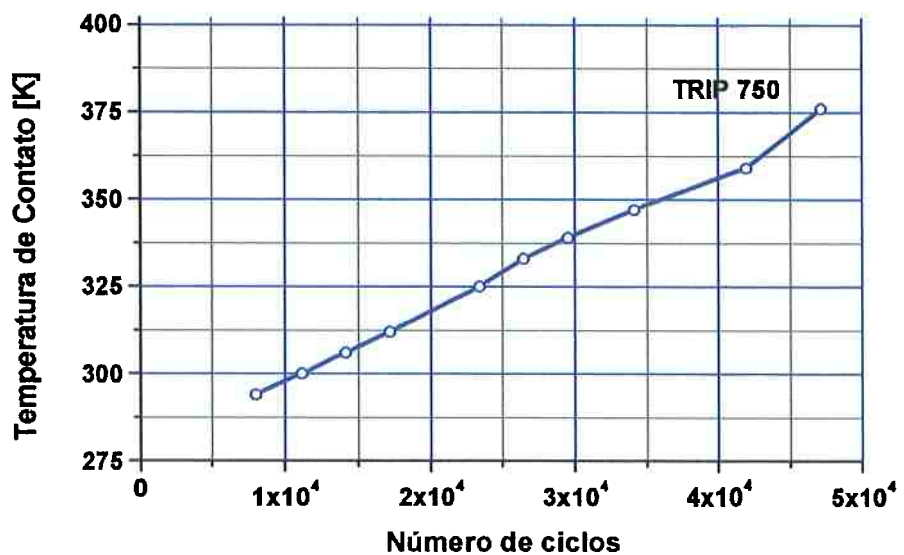


Figura 252. Evolução da umidade da sala e temperatura de contato no ensaio do par de discos de Aço AISI 52100 SBQT S10MR(motor) e Aço AISI 1045 nitretado a plasma, RN1 (movido)

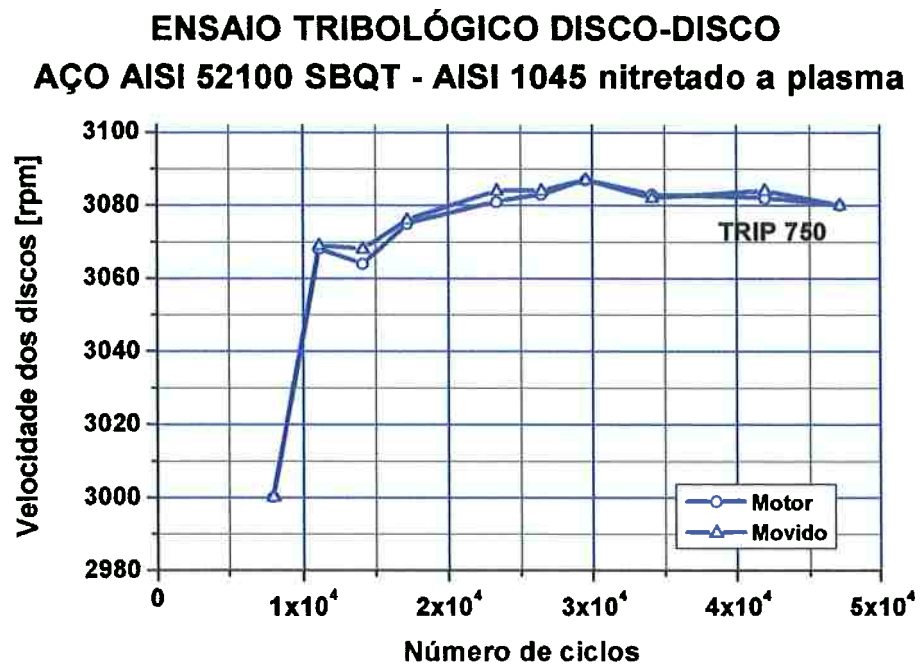
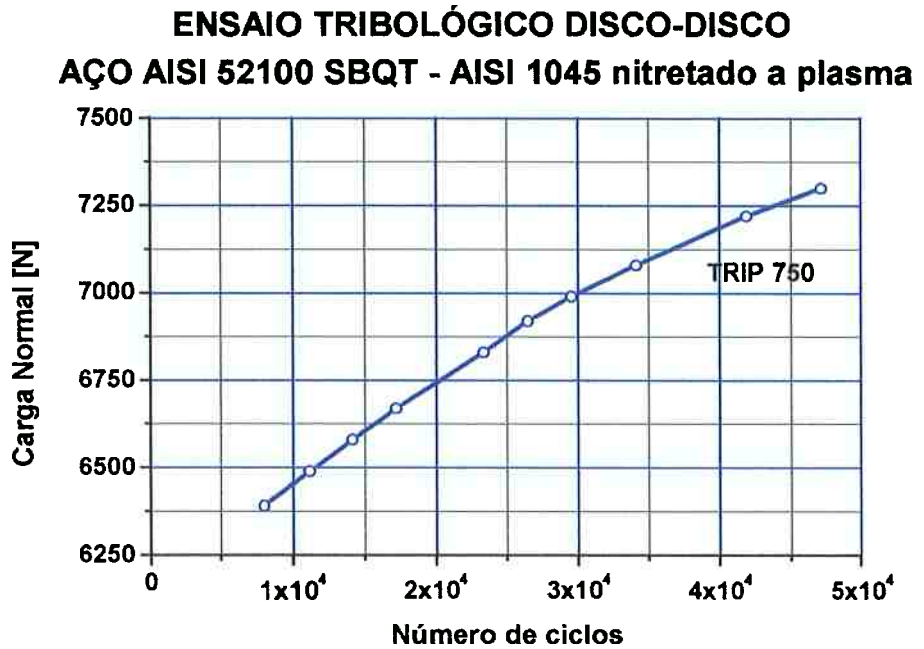
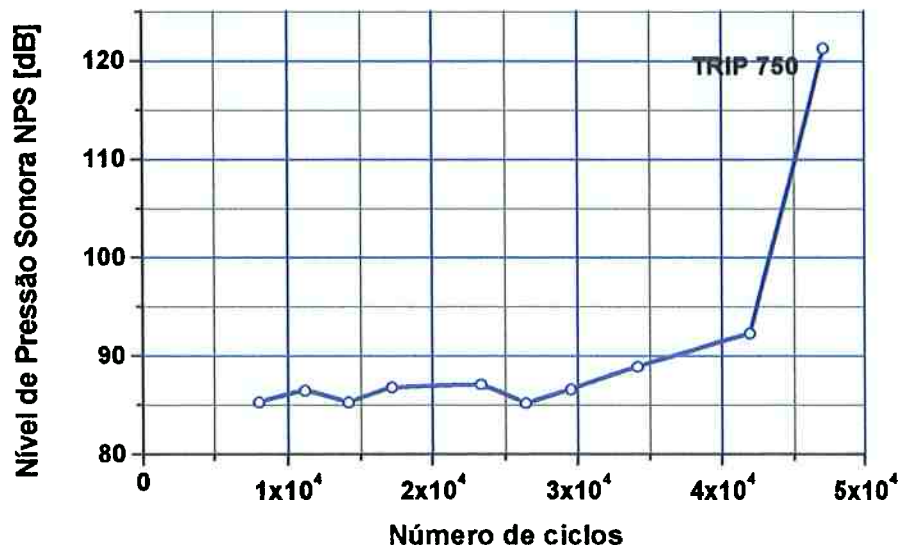


Figura 253. Evolução da carga normal de contato e velocidade durante o ensaio do par de discos de Aço AISI 52100 SBQT S10MR(motor) e Aço AISI 1045 nitretado a plasma, RN1 (movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO
AÇO AISI 52100 SBQT - AISI 1045 nitretado a plasma



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO
AÇO AISI 52100 SBQT - AISI 1045 nitretado a plasma

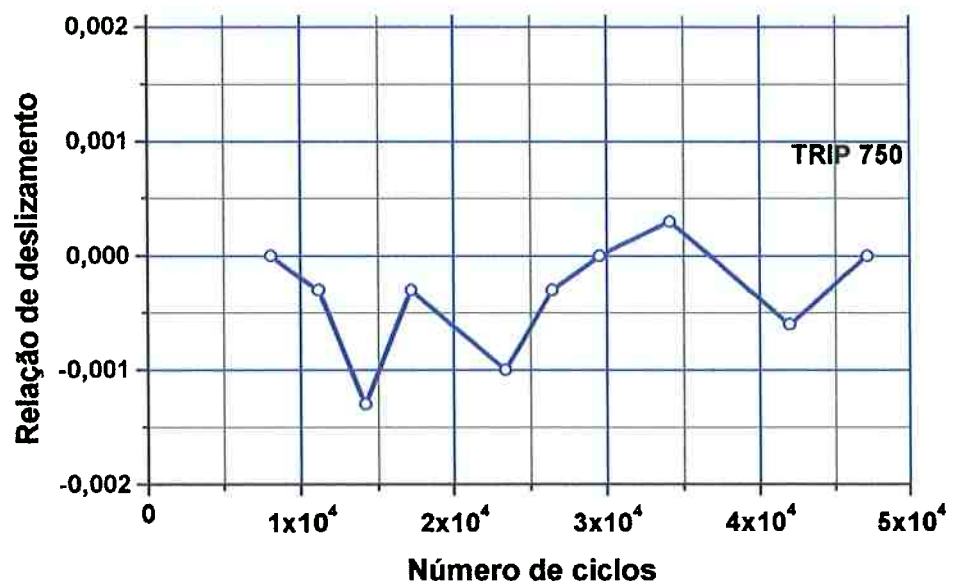
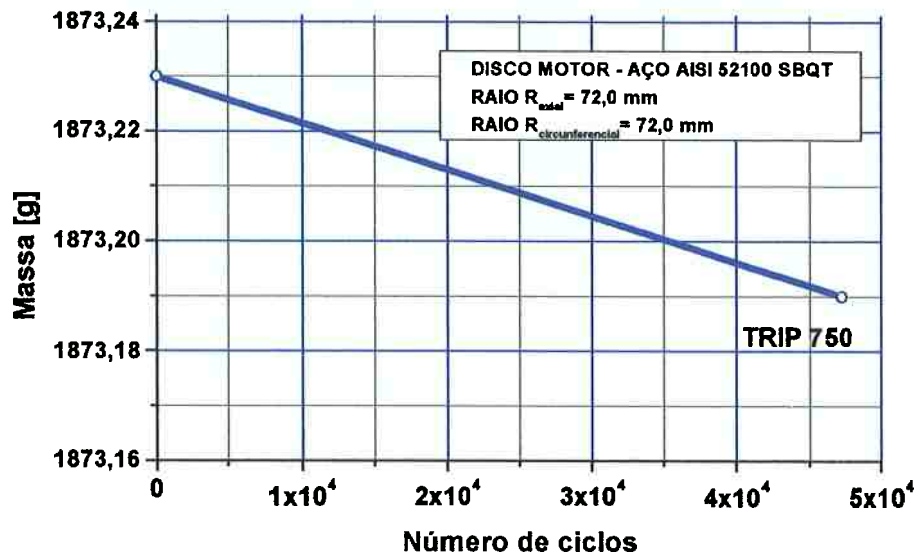


Figura 254. Evolução do Nível de Pressão Sonora e relação de deslizamento do par de discos de Aço AISI 52100 SBQT S10MR(motor) e Aço AISI 1045 nitretado a plasma, RN1 (movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO
AÇO AISI 52100 SBQT - AISI 1045 nitretado a plasma



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO
AÇO AISI 52100 SBQT - AISI 1045 nitretado a plasma

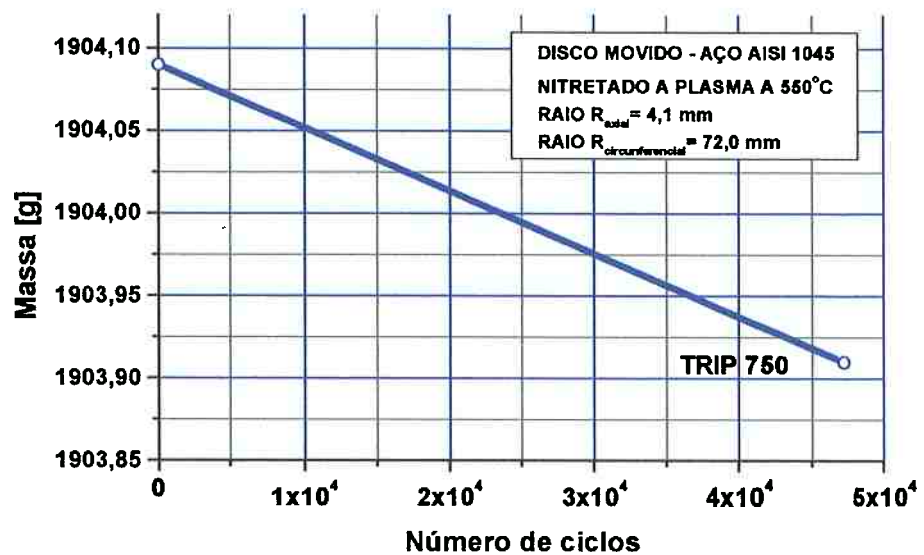
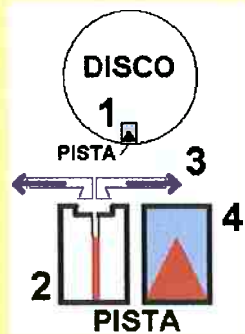
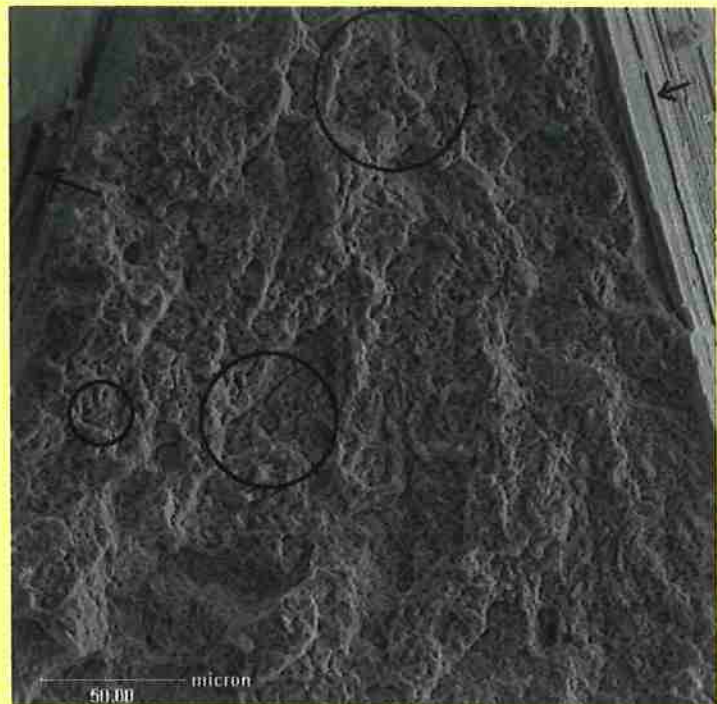


Figura 255. Evolução da perda de massa dos discos motor e movido no ensaio do par de discos de Aço AISI 52100 SBQT S10MR(motor) e Aço AISI 1045 nitretado a plasma, RN1 (movido)



Fotografia SEM-SE (elétrons secundários) de corpo-de-prova "Chevron" extraído do disco S10 e ensaiado



Mesma zona anterior do "Chevron", em fotografia SEM-BSE (elétrons retroespalhados) evidenciando-se microtrincas a) intergranulares e na zona de interface matriz-partículas de segunda fase; b) na zona de intensificação de tensão da interface da seção "Chevron" e da fenda retificada

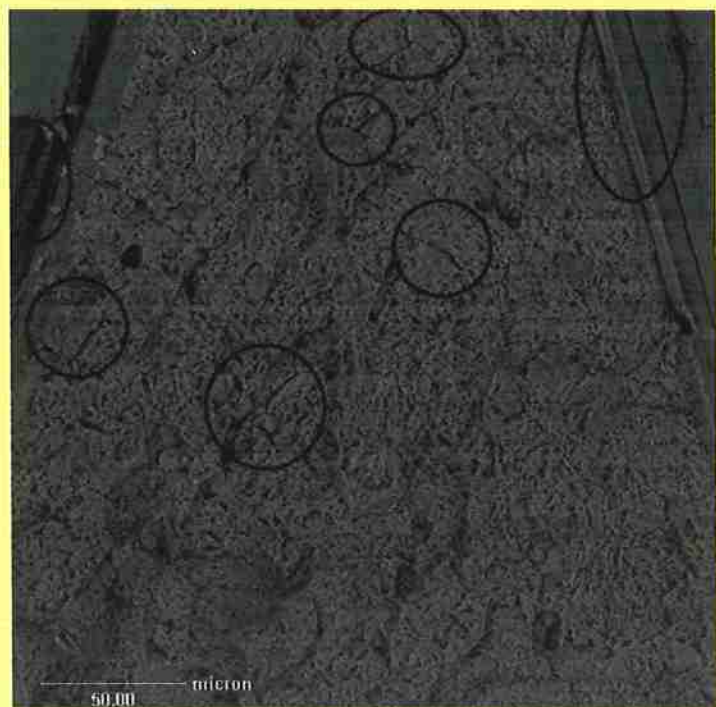
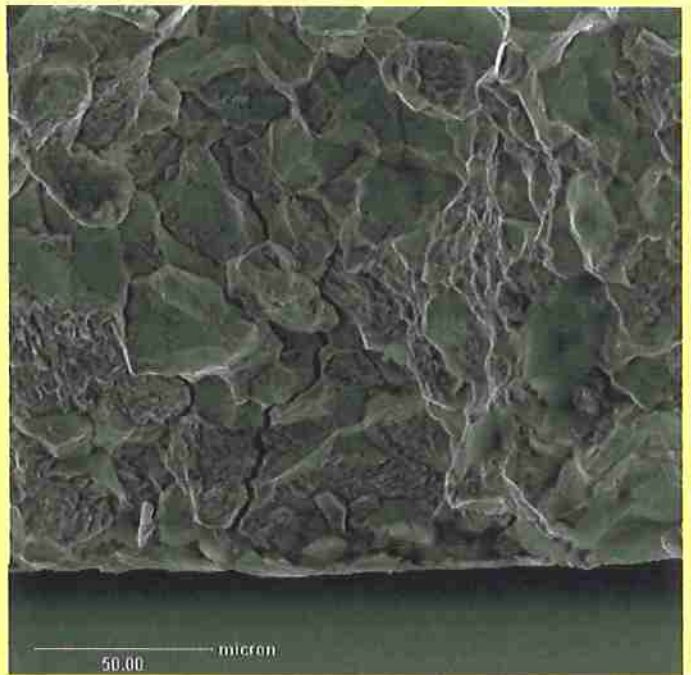


Figura 256. Microtrincas na seção transversal do disco S10 após ensaiado por rolamento e submetido a ensaio "Chevron"



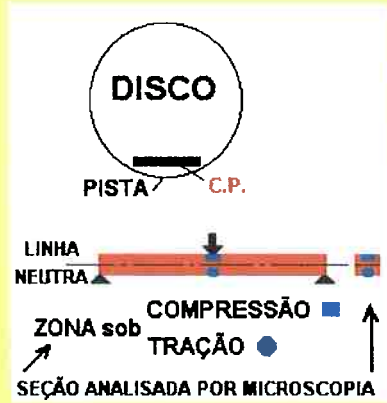
ZONA SOB TRAÇÃO

Setas sinalizam para a extrusão de material da matriz, próximo à seção fraturada, através de mecanismo intensificado pela carga concentrada, microcortes e sulcamentos do processo de retificação, tensão residual e micro-estrutura do material



ZONA SOB COMPRESSÃO

Figura 257. Propagação da trinca nas seções transversais sob tração (acima) e compressão (embaixo) de um mesmo corpo-de-prova extraído do disco S10 e submetido ao ensaio de flexão três pontos



Trinca intensificada por inclusão de óxido na matriz

ZONA SOB TRACÃO



Mecanismo de extrusão

ZONA SOB COMPRESSÃO

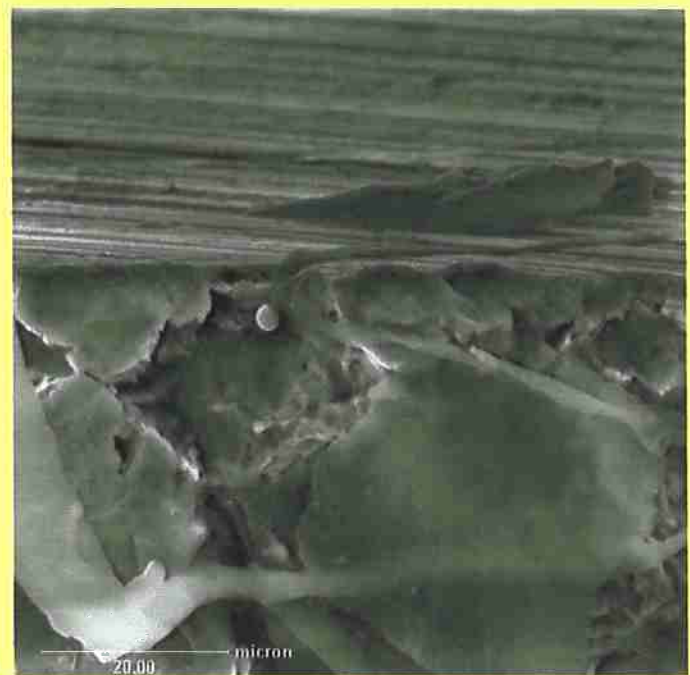
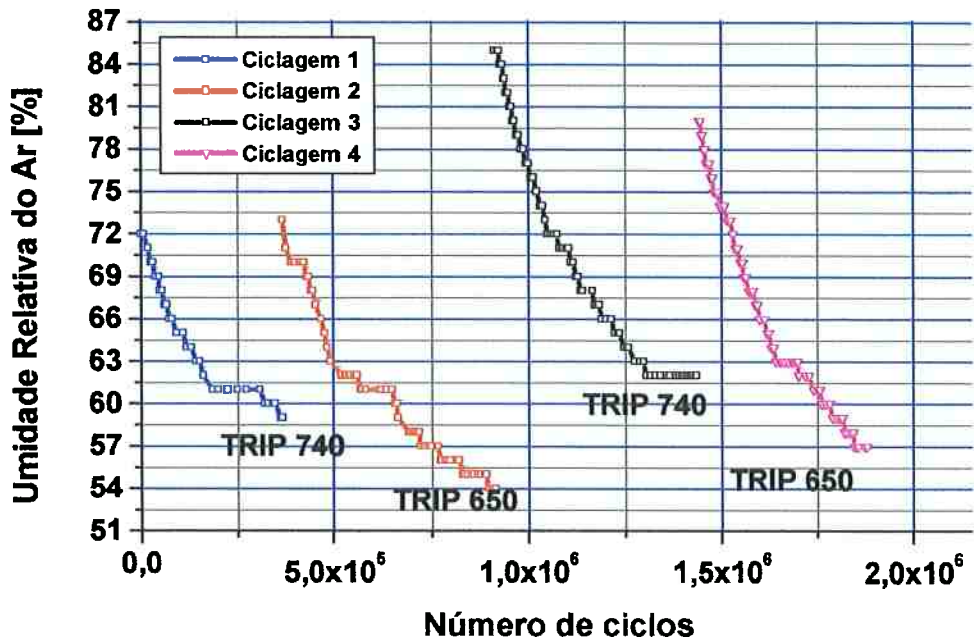


Figura 258. Propagação da trinca nas seções transversais sob tração (acima) e compressão (embaixo) de um mesmo corpo-de-prova extraído do disco S10 e submetido ao ensaio de flexão três pontos

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-ADI



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-ADI

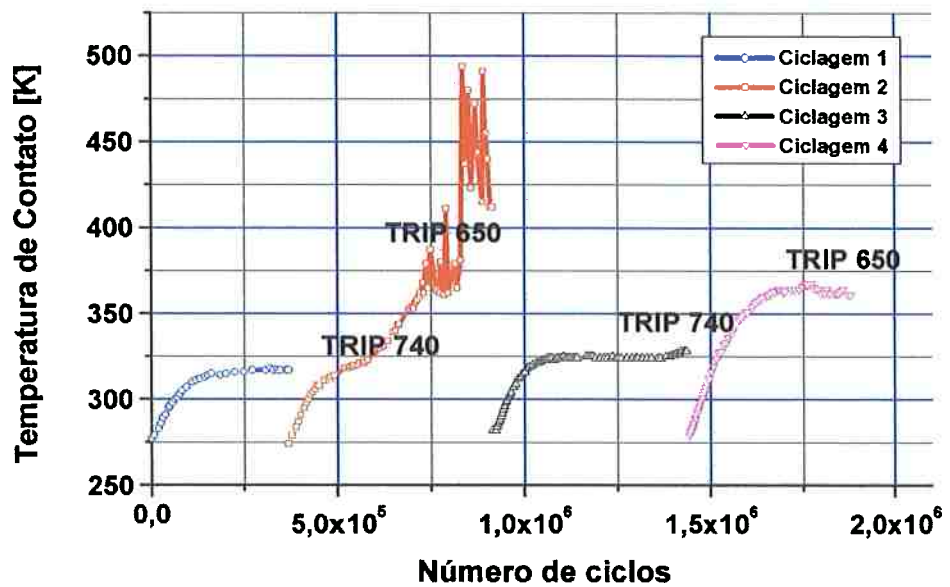
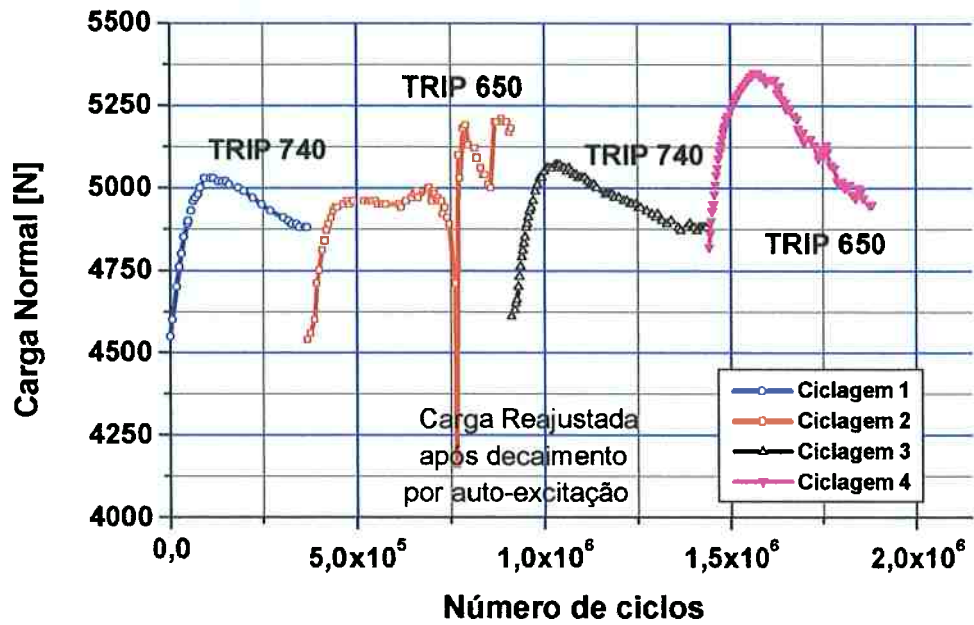


Figura 259. Evolução da umidade da sala e temperatura de contato durante o ensaio do par de discos de Aço AISI 52100 S03SBQT (motor) e ADI 03 Nitretado (movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-ADI



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-ADI

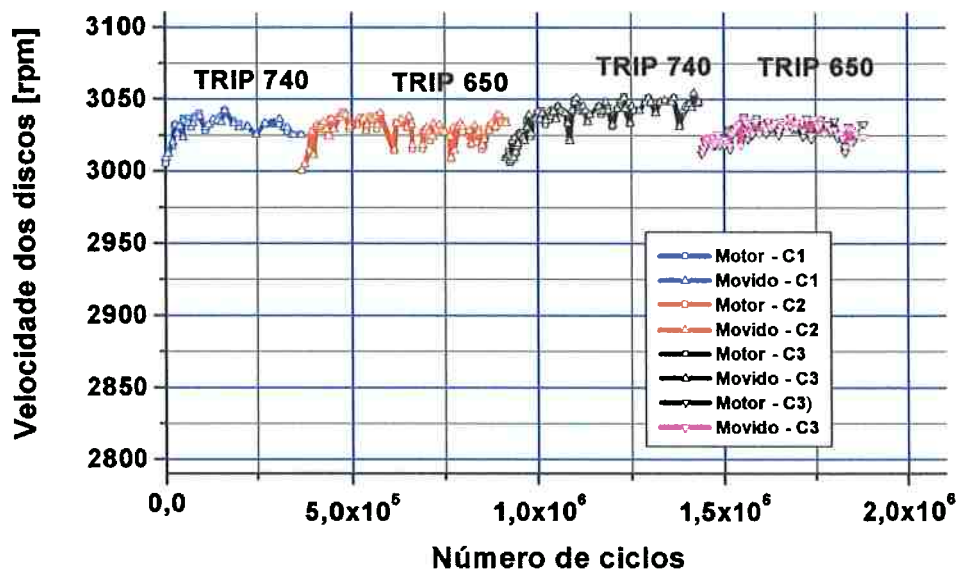
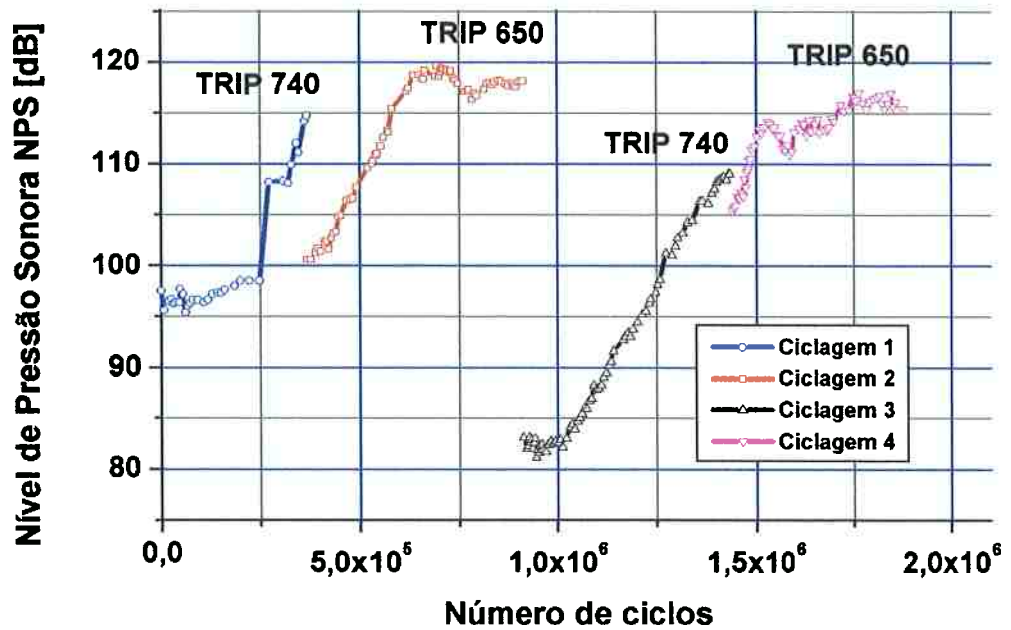


Figura 260. Evolução da carga normal de contato e velocidade durante o ensaio do par de discos de Aço AISI 52100 S03SBQT (motor) e ADI 03 Nitretado (movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-ADI



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-ADI

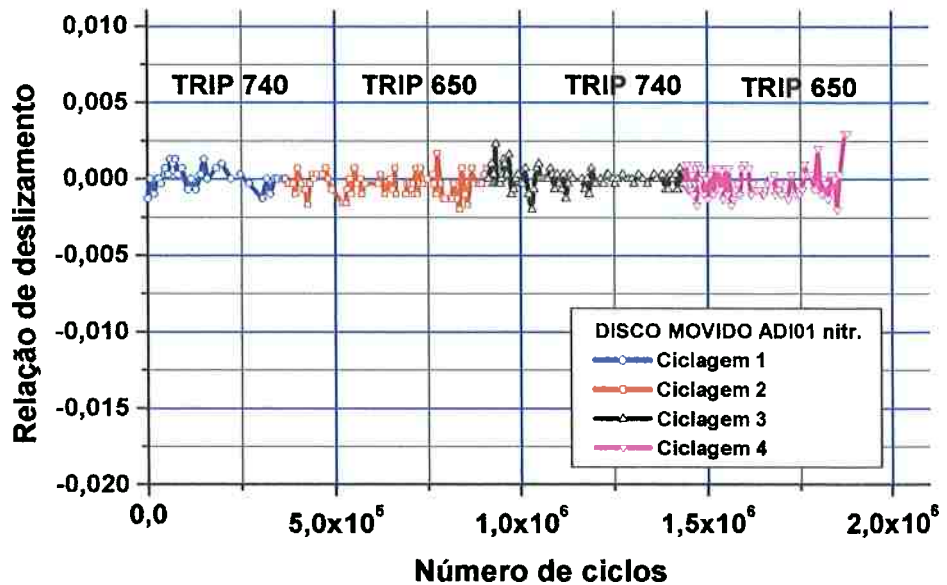
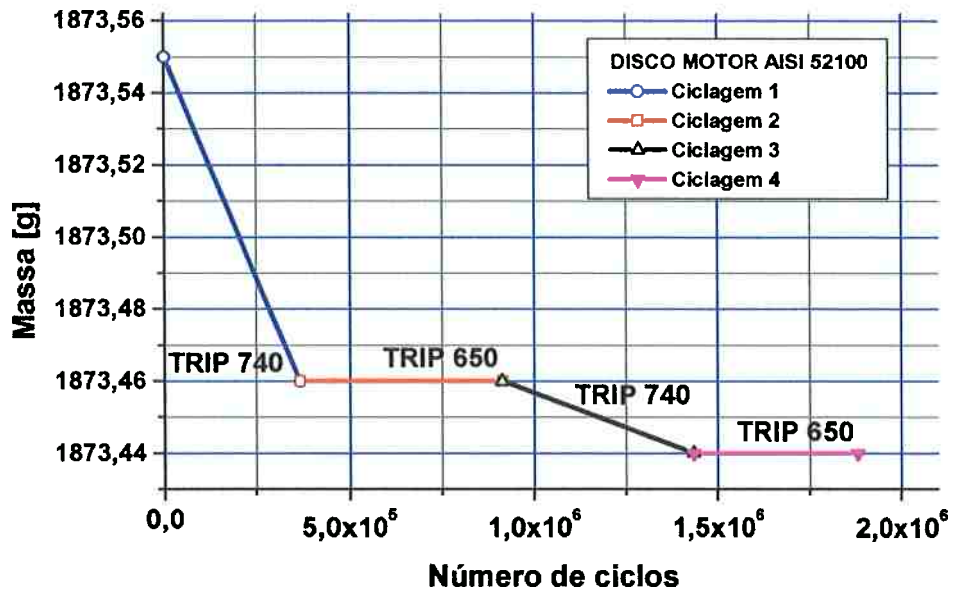


Figura 261. Nível de Pressão Sonora e relação de deslizamento durante o ensaio do par de discos de Aço AISI 52100 S03SBQT (motor) e ADI 03 Nitretado (movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-ADI



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-ADI

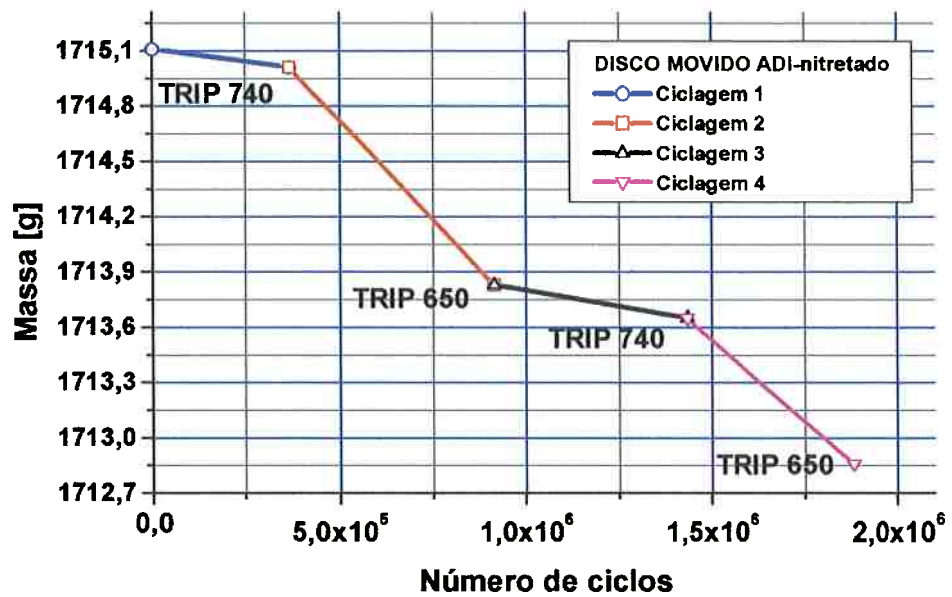


Figura 262. Perda de massa dos discos motor e movido durante o ensaio do par de discos de Aço AISI 52100 S03SBQT (motor) e ADI 03 Nitretado (movido)

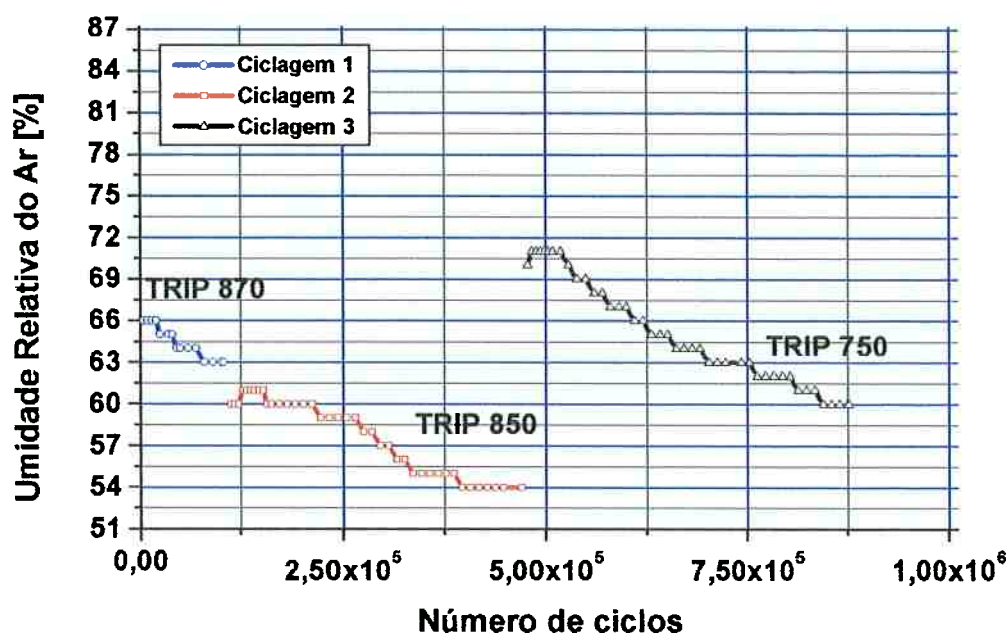
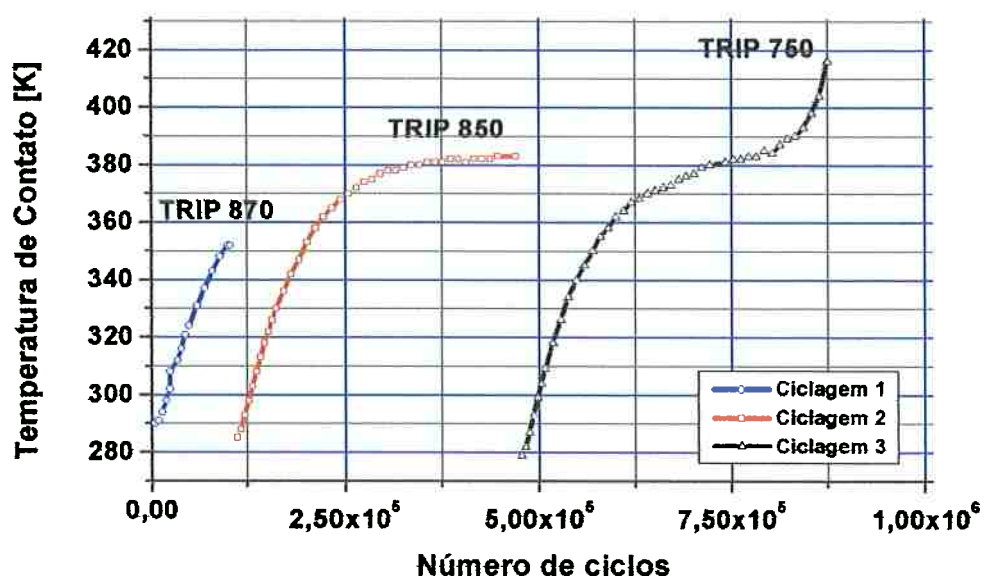
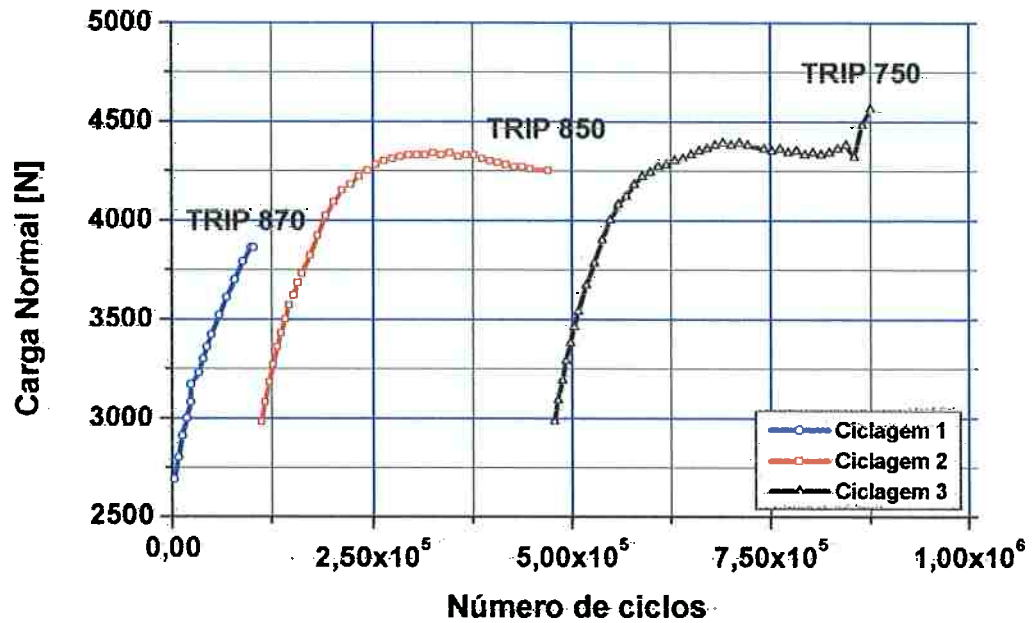
ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-ADI**ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-ADI**

Figura 263. Evolução da umidade da sala e temperatura de contato durante o ensaio do par de discos de Aço AISI 52100 S05SBQT (motor) e ADI 13 Nitretado (movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-ADI



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-ADI

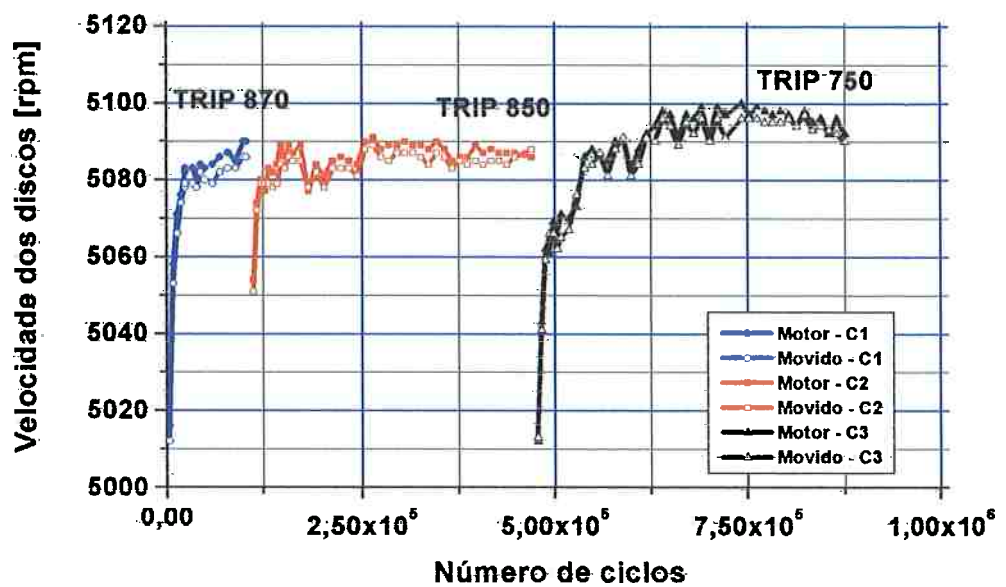
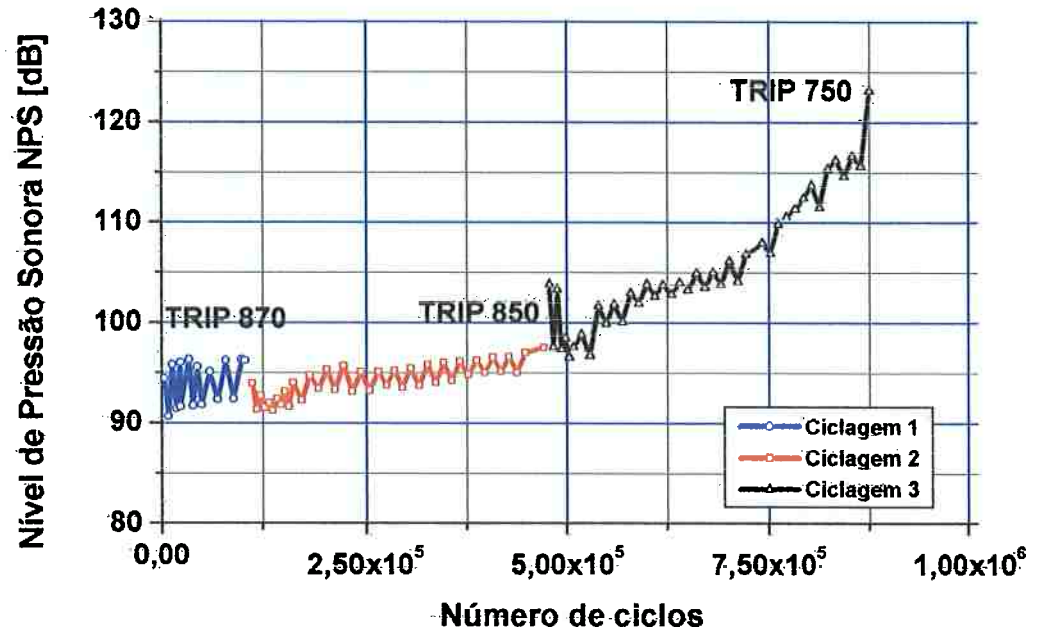


Figura 264. Evolução da carga normal de contato e velocidade durante o ensaio do par de discos de Aço AISI 52100 S05SBQT (motor) e ADI 13 Nitretado (movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-ADI



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-ADI

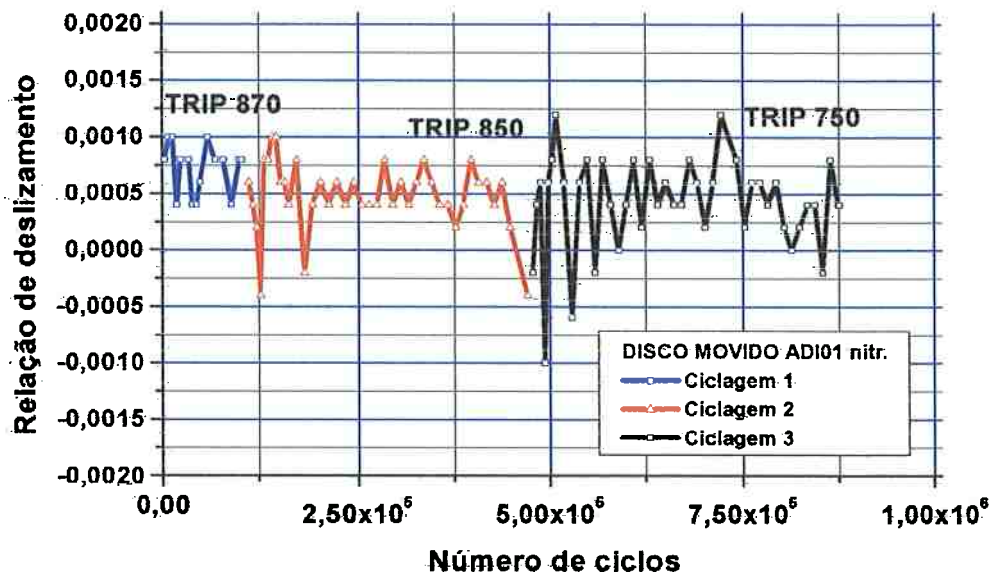
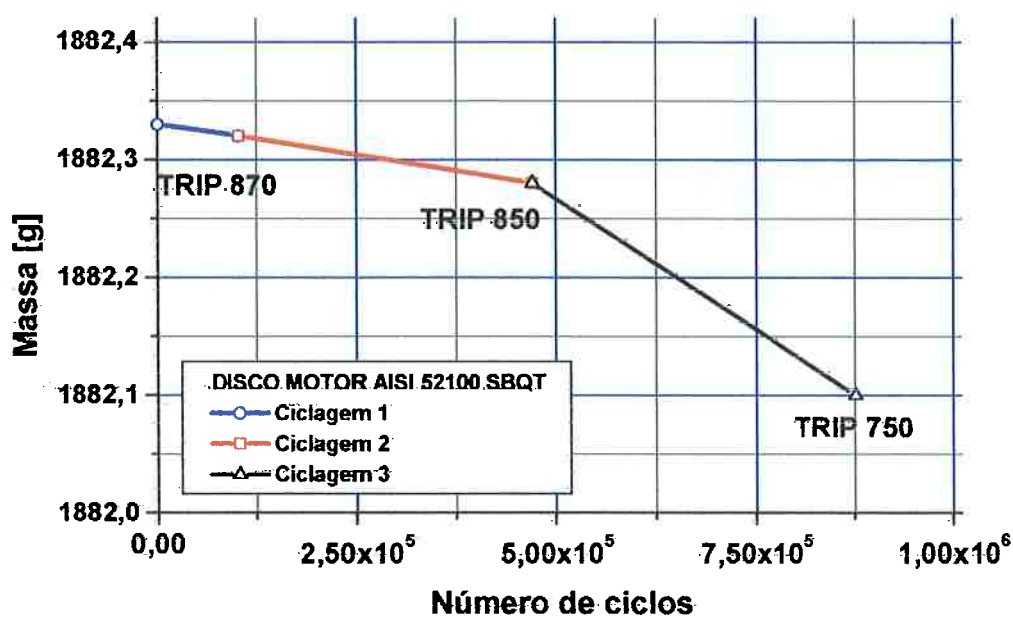


Figura 265. Evolução do Nível de Pressão Sonora e relação de deslizamento durante o par de discos de Aço AISI 52100 S05SBQT (motor) e ADI 13 Nitretado (movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-ADI



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-ADI

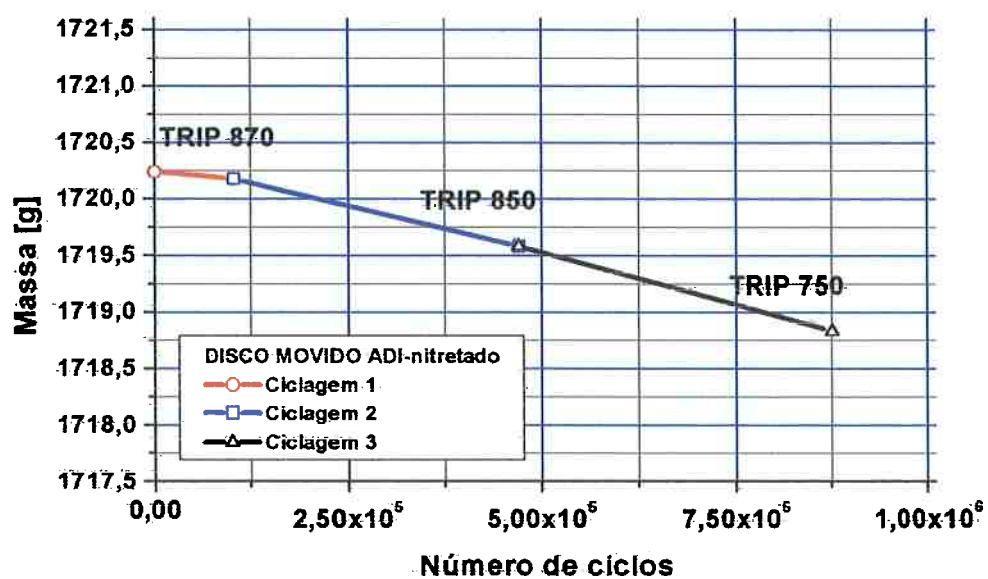


Figura 266. Evolução da perda de massa dos discos motor e movido durante o ensaio do par de discos de Aço AISI 52100 S05SBQT (motor) e ADI 13 Nitretado (movido)

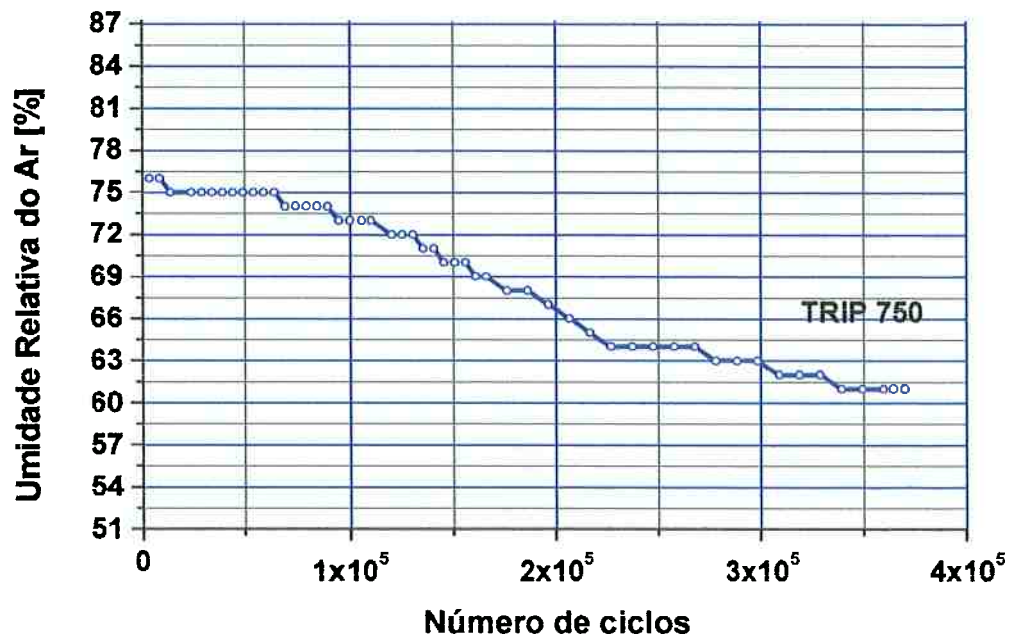
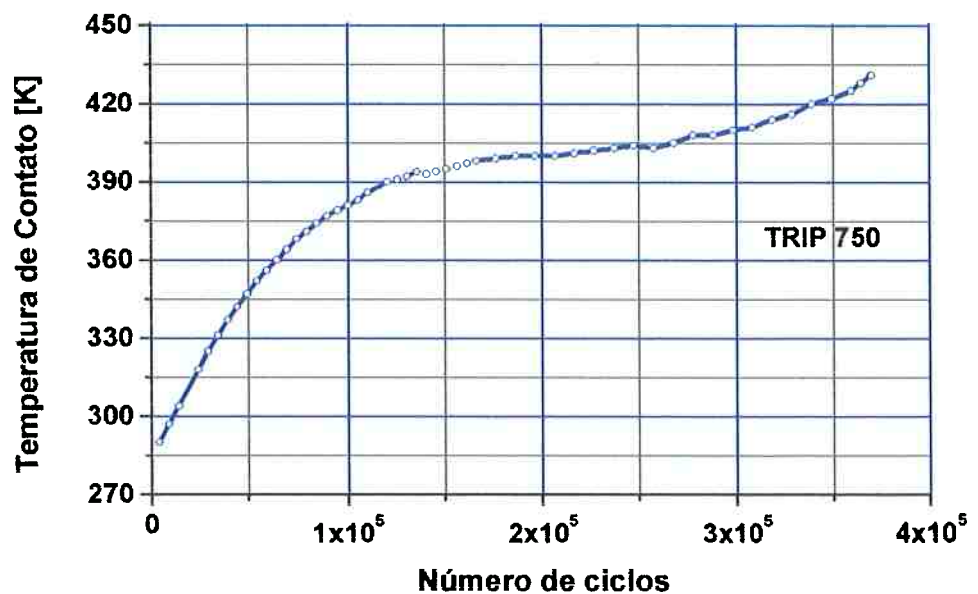
ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-ADI**ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-ADI**

Figura 267. Evolução da umidade da sala e temperatura de contato durante o ensaio do par de discos de Aço AISI 52100 S07SBQT (motor) e ADI 18 Nitretado (movido)

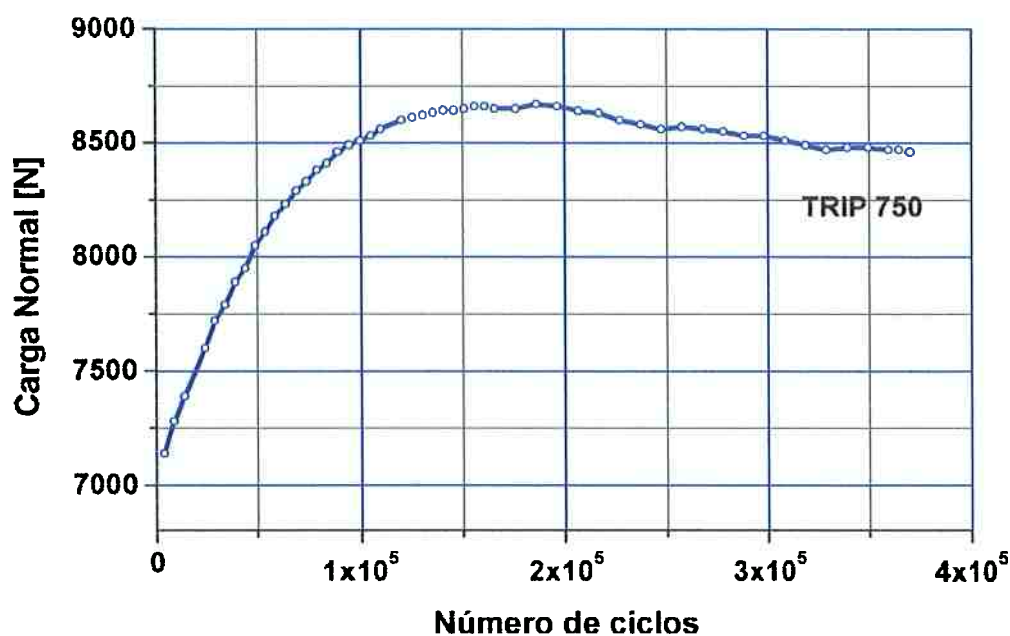
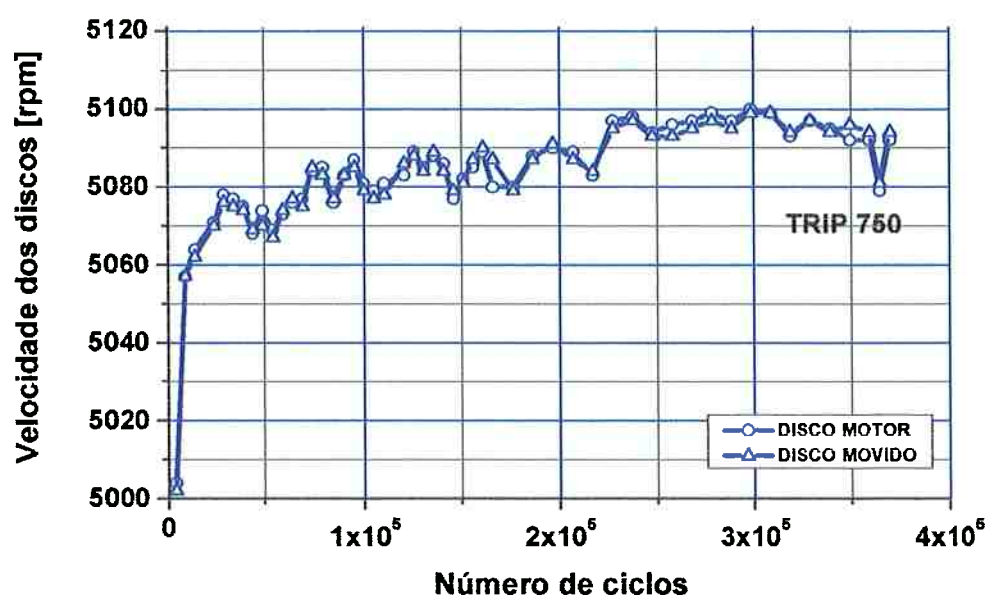
ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-ADI**ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-ADI**

Figura 268. Evolução da carga normal de contato e velocidade durante o ensaio do par par de discos de Aço AISI 52100 S07SBQT (motor) e ADI 18 Nitretado (movido)

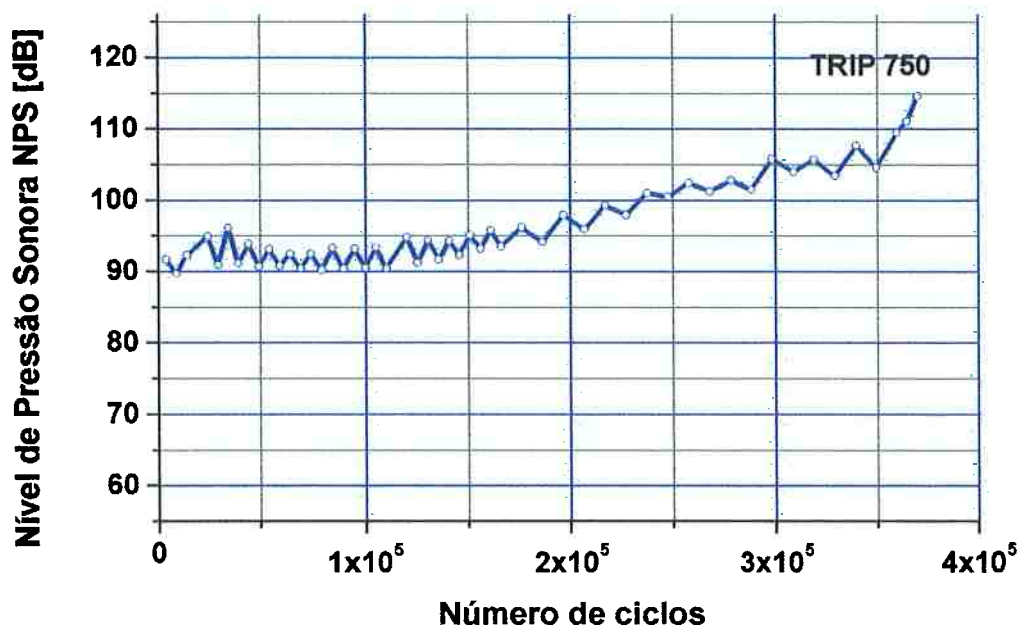
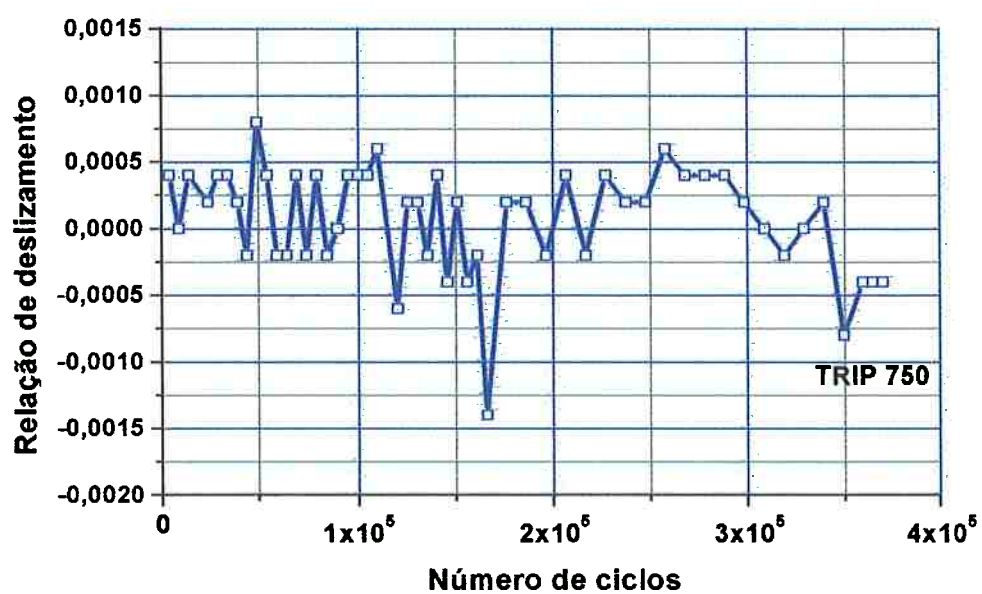
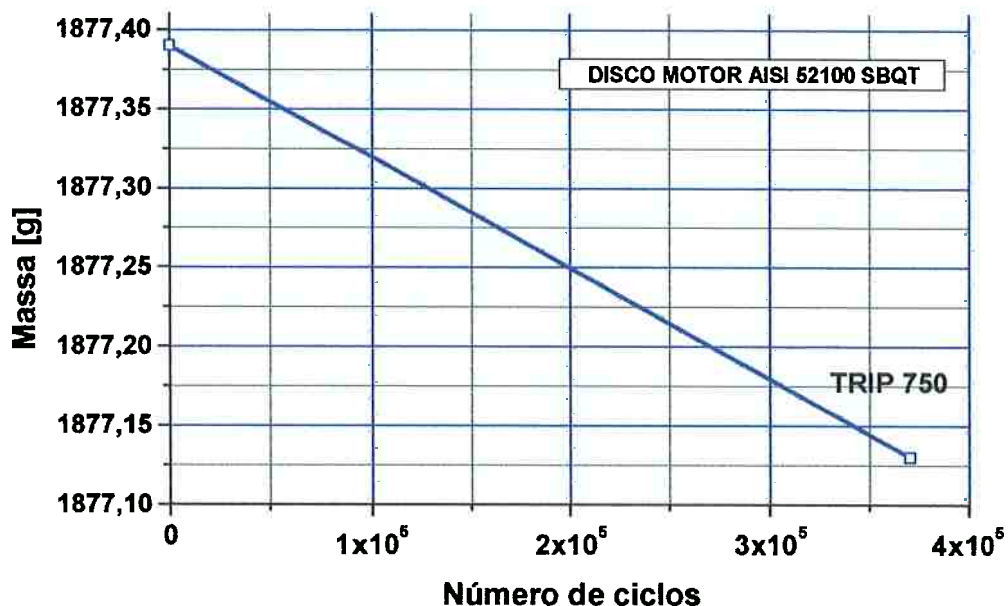
ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-ADI**ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-ADI**

Figura 269. Evolução do Nível de Pressão Sonora e relação de deslizamento durante o par de discos de Aço AISI 52100 S07SBQT (motor) e ADI 18 Nitretado (movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-ADI



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-ADI

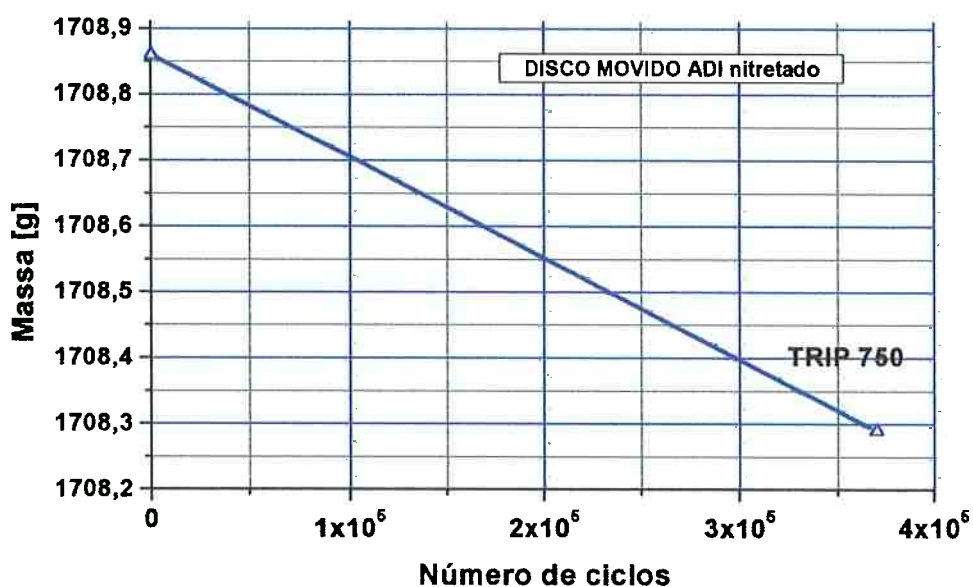


Figura 270. Evolução da perda de massa dos discos motor e movido durante o ensaio do par de discos de Aço AISI 52100 S07SBQT (motor) e ADI 18 Nitretado (movido)

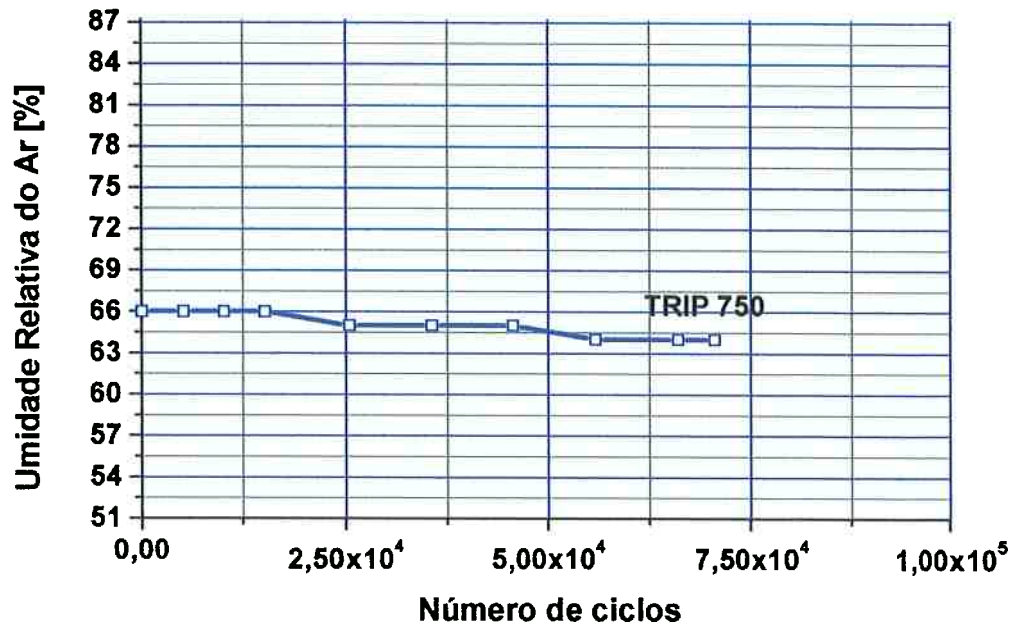
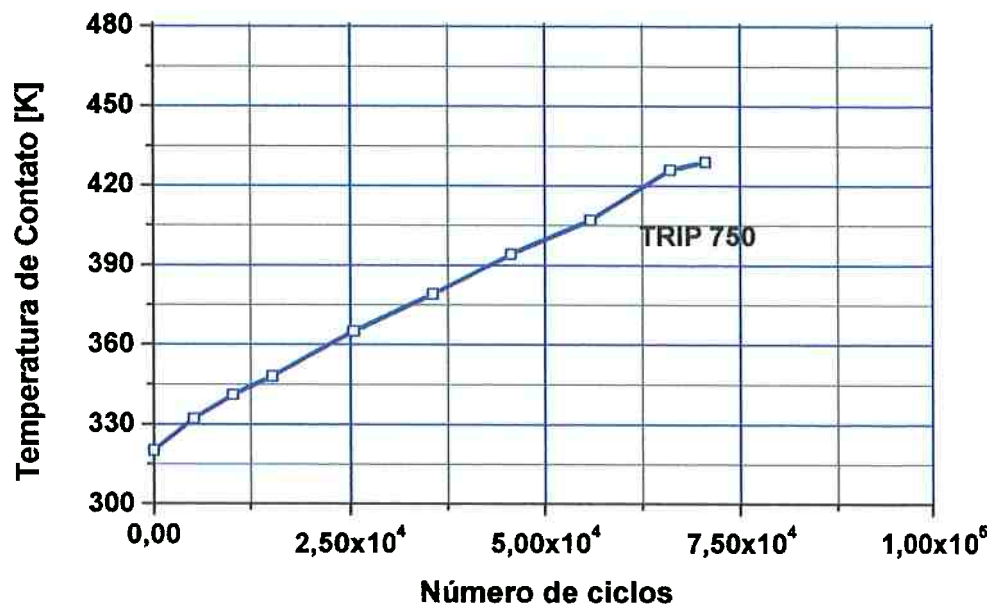
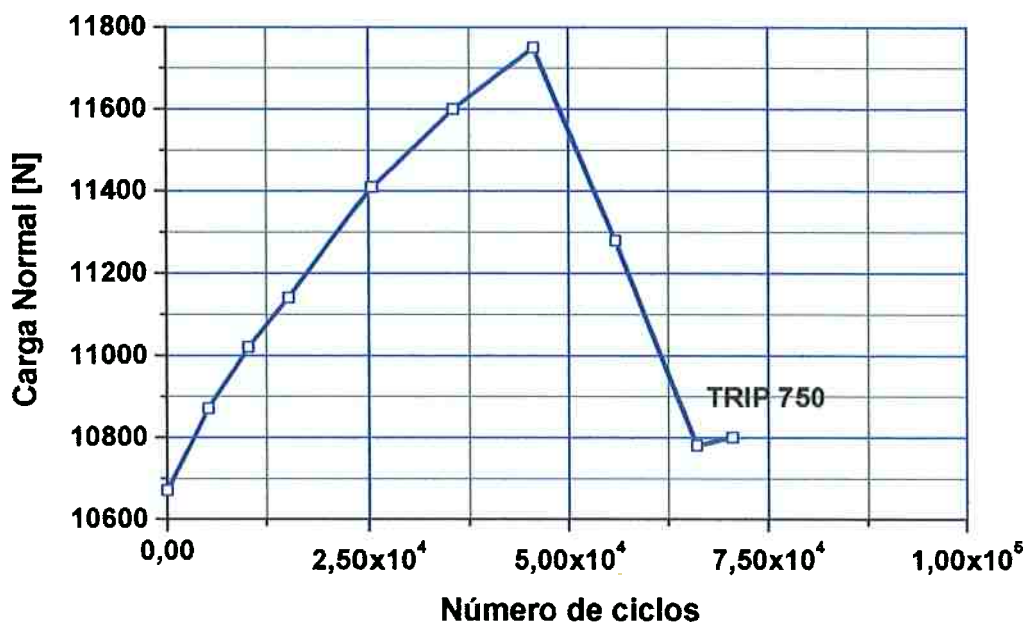
ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-ADI**ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-ADI**

Figura 271. Evolução da umidade da sala e temperatura de contato durante o ensaio do par de discos de Aço AISI 52100 S02SBQT (motor) e ADI 17 Nitretado (movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-ADI



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-ADI

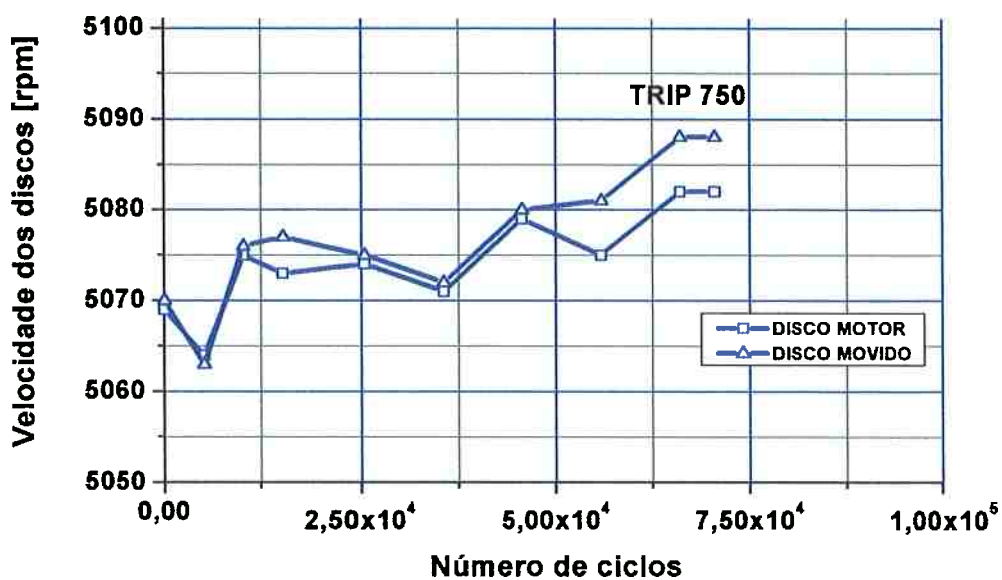


Figura 272. Evolução da carga normal de contato e velocidade durante o ensaio do par de discos de Aço AISI 52100 S02SBQT (motor) e ADI 17 Nitretado (movido)

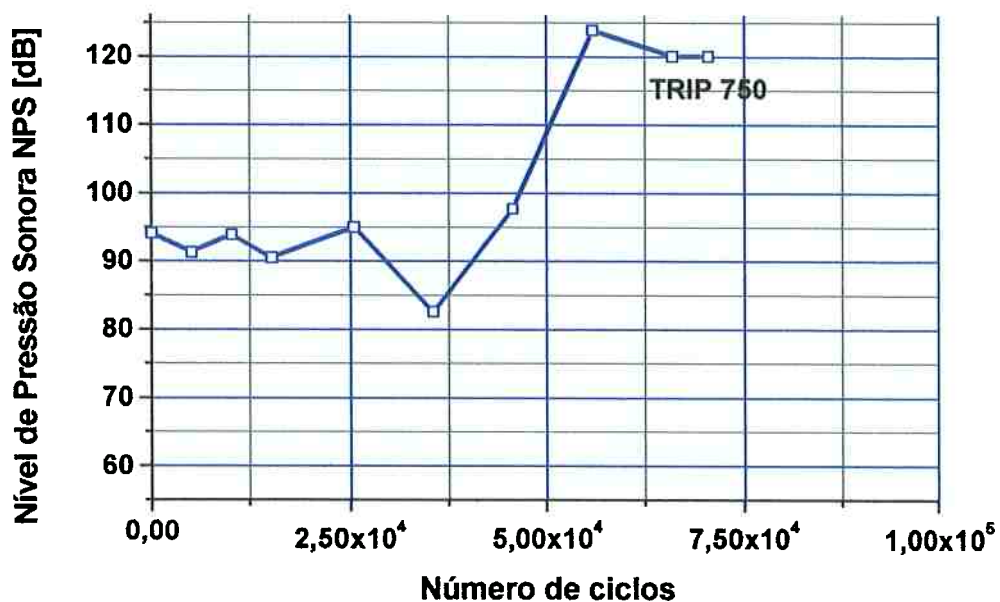
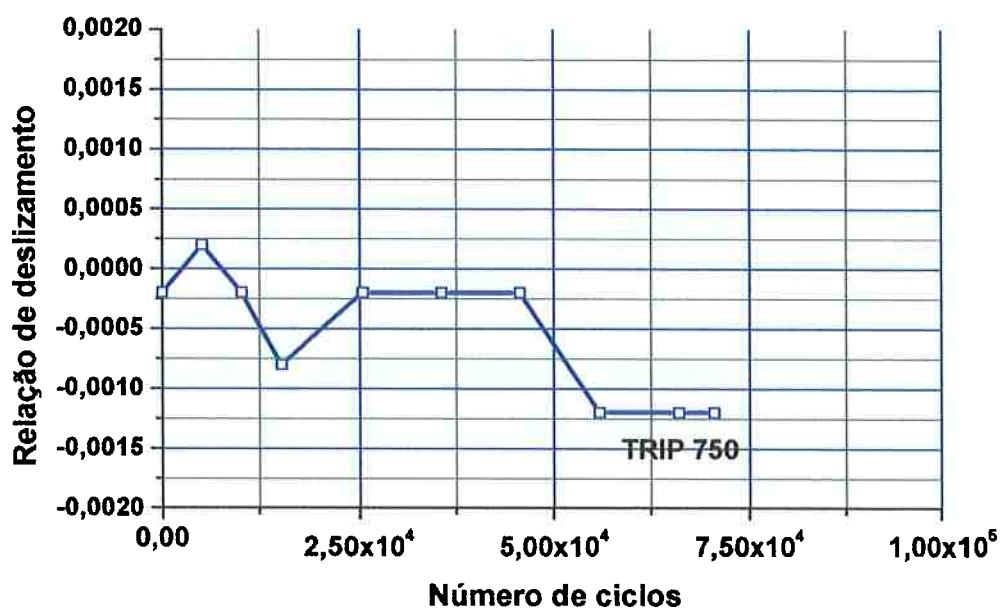
ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-ADI**ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-ADI**

Figura 273. Evolução do Nível de Pressão Sonora e relação de deslizamento durante o par de discos de Aço AISI 52100 S02SBQT (motor) e ADI 17 Nitretado (movido)

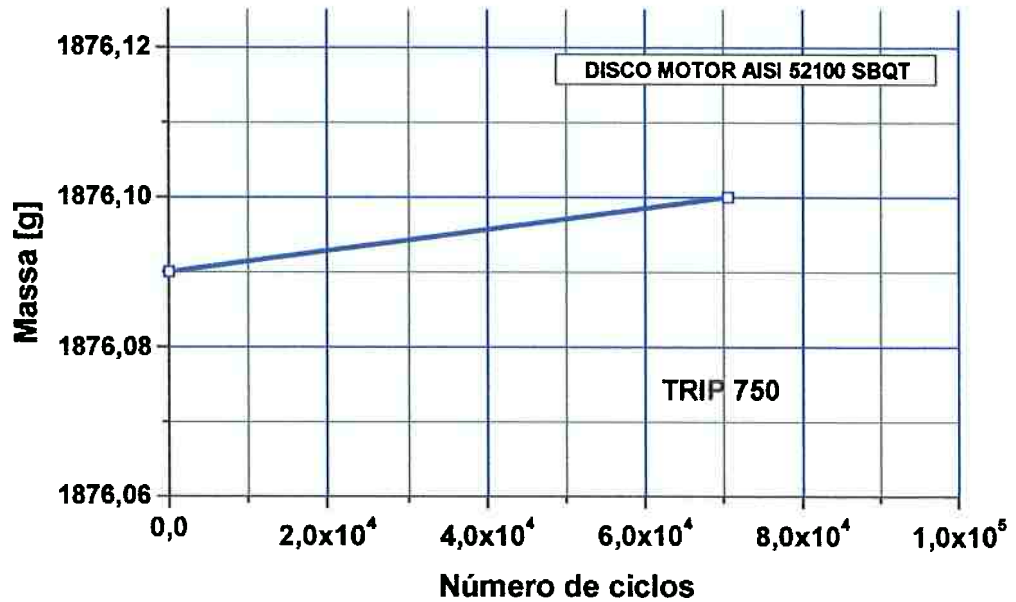
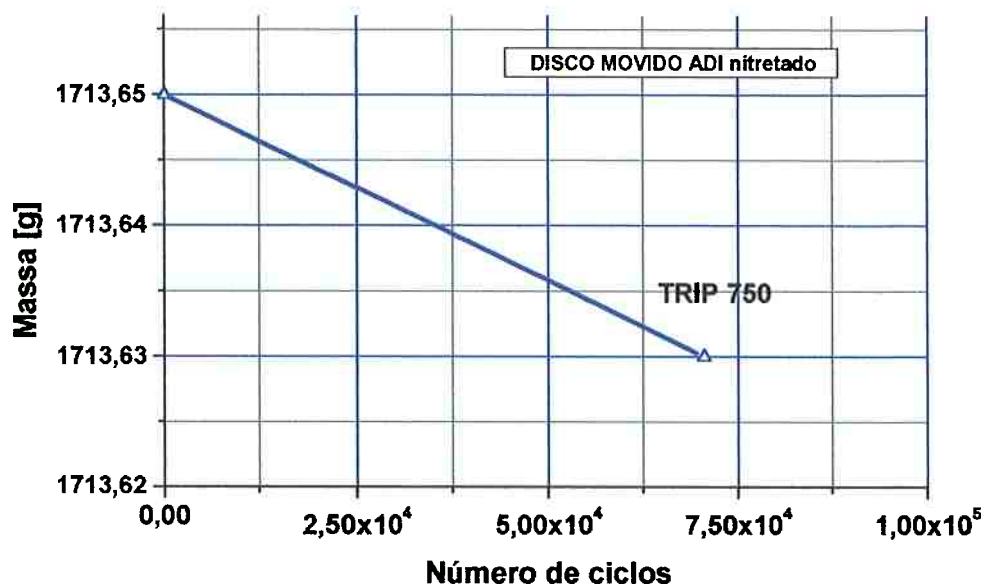
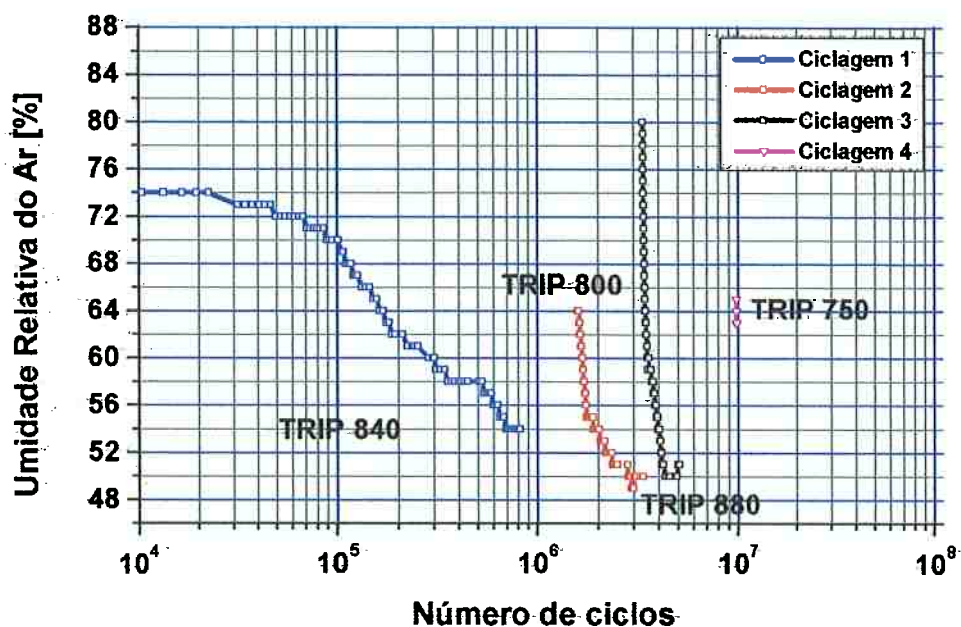
ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-ADI**ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-ADI**

Figura 274. Evolução da perda de massa dos discos motor e movido durante o ensaio do par de discos de Aço AISI 52100 S02SBQT (motor) e ADI 17 Nitretado (movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO ADI-ADI



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO ADI-ADI

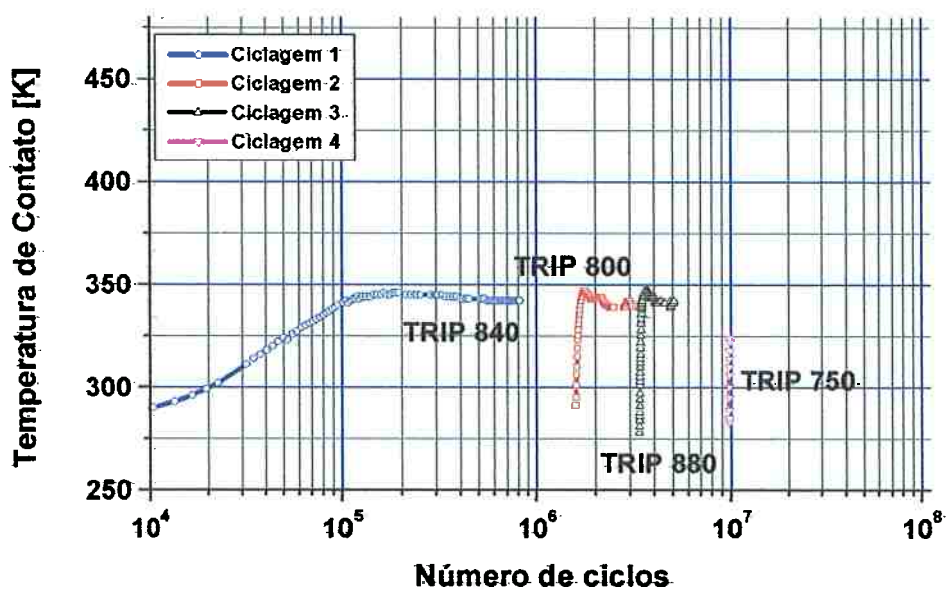
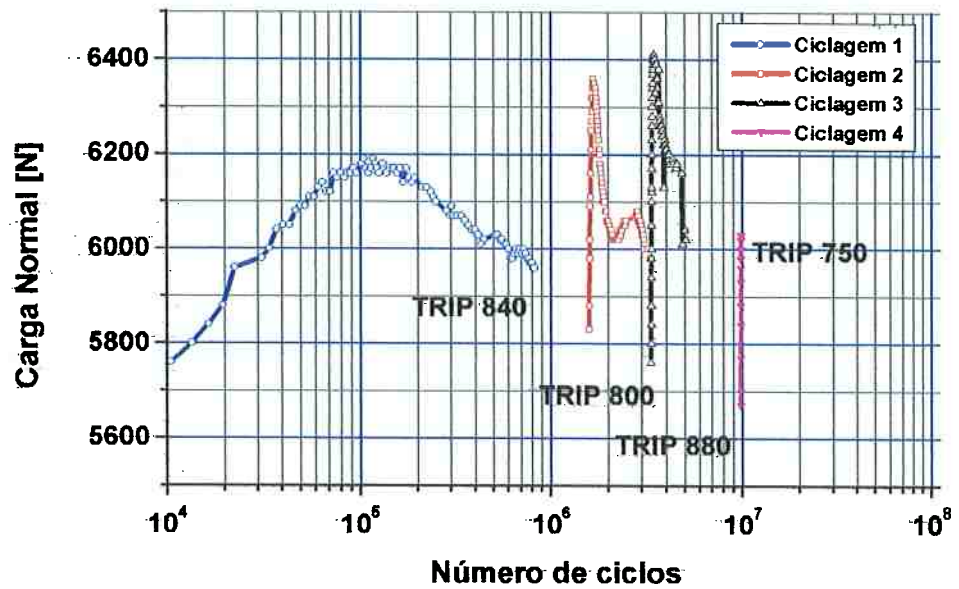


Figura 275. Evolução da umidade da sala e temperatura de contato durante o ensaio do par de discos de ADI 02 Nitretado (motor) e ADI 04 Nitretado (movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO ADI-ADI



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO ADI-ADI

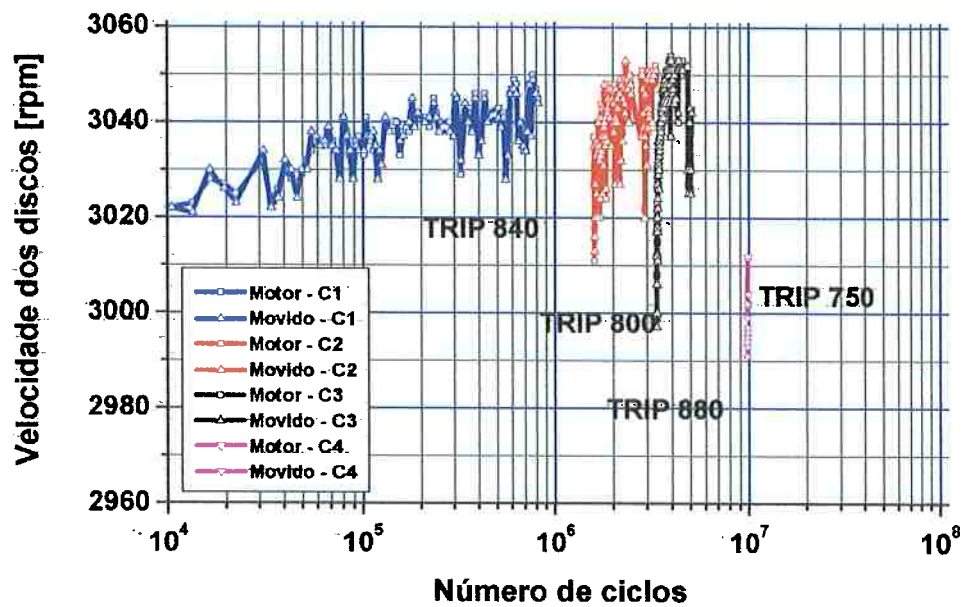
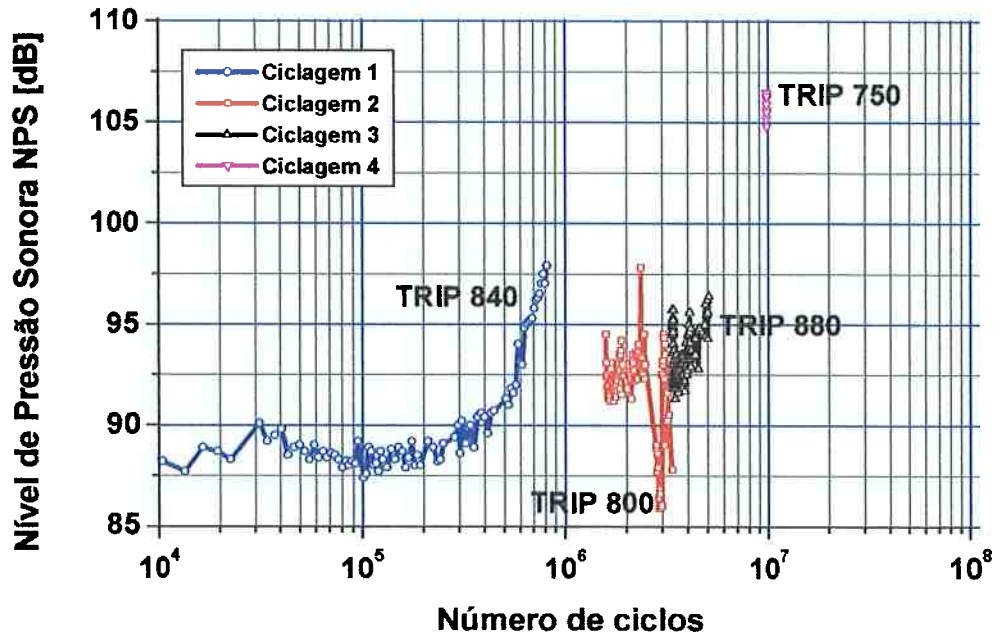


Figura 276. Evolução da carga normal de contato e velocidade durante o ensaio do par de discos de ADI 02 Nitretado (motor) e ADI 04 Nitretado (movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO ADI-ADI



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO ADI-ADI

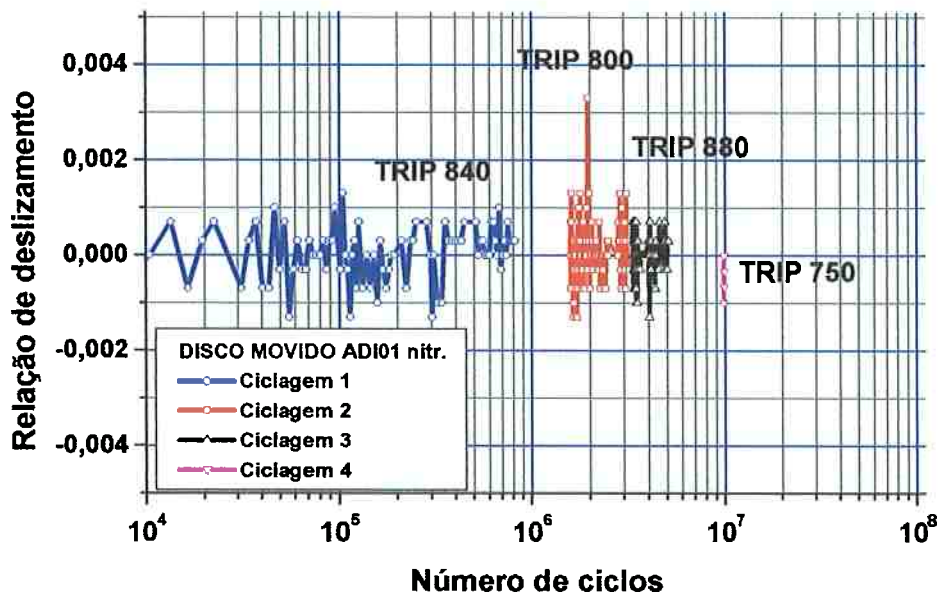
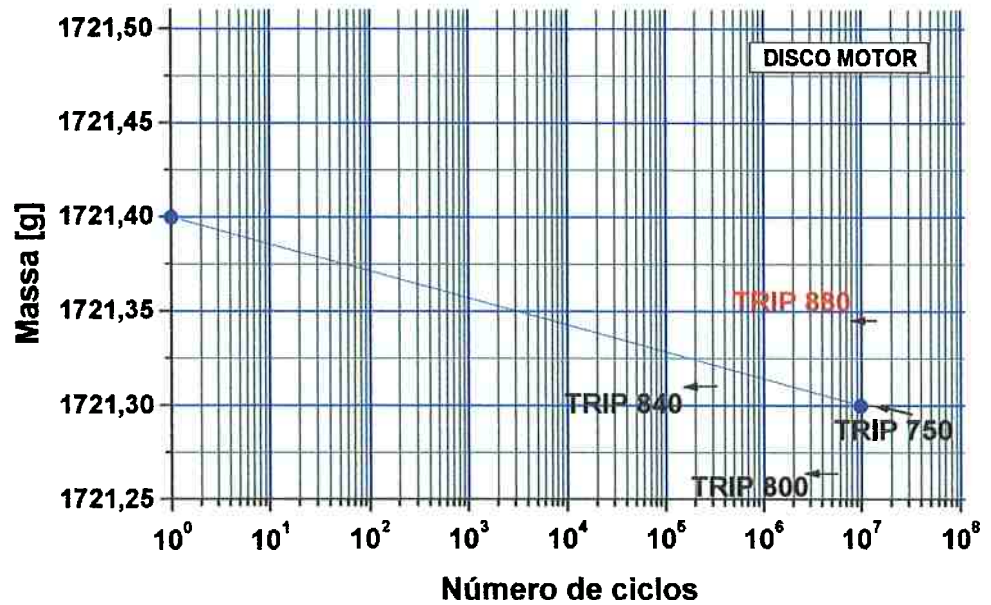


Figura 277. Evolução do Nível de Pressão Sonora e relação de deslizamento durante o par de discos de ADI 02 Nitretado (motor) e ADI 04 Nitretado (movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO ADI-ADI



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO ADI-ADI

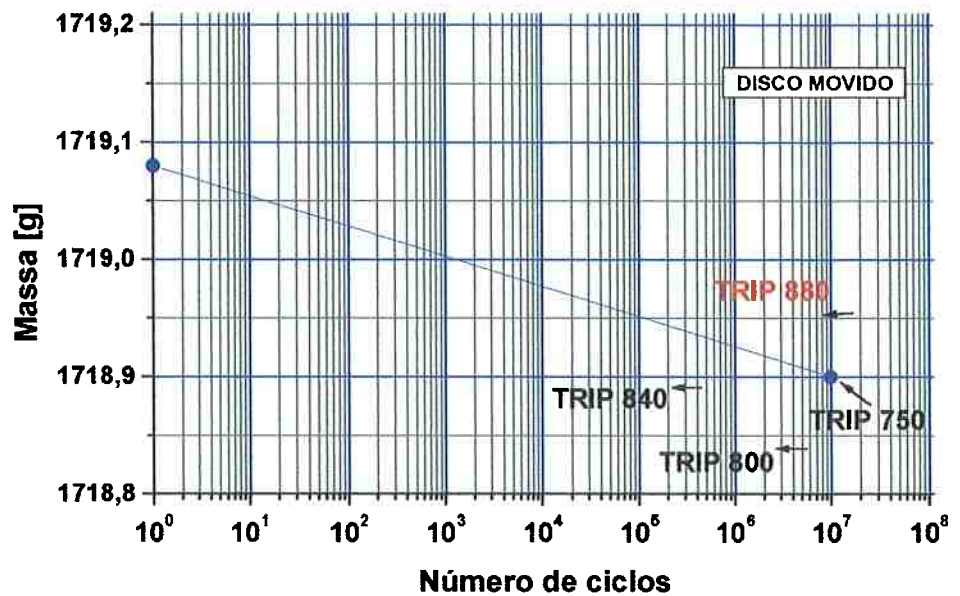
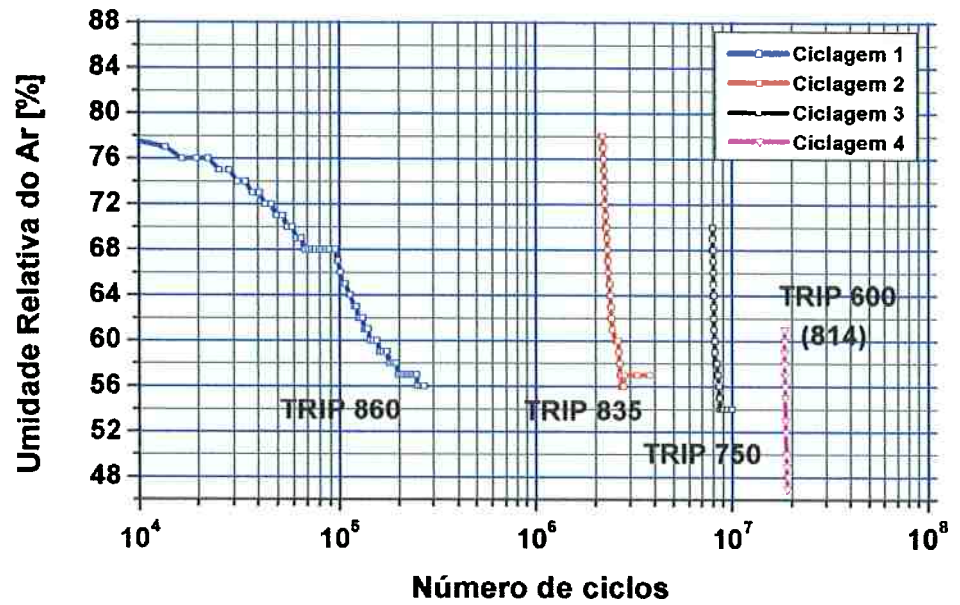


Figura 278. Evolução da perda de massa dos discos motor e movido durante o ensaio do par de discos de ADI 02 Nitretado (motor) e ADI 04 Nitretado (movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO ADI-ADI



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO ADI-ADI

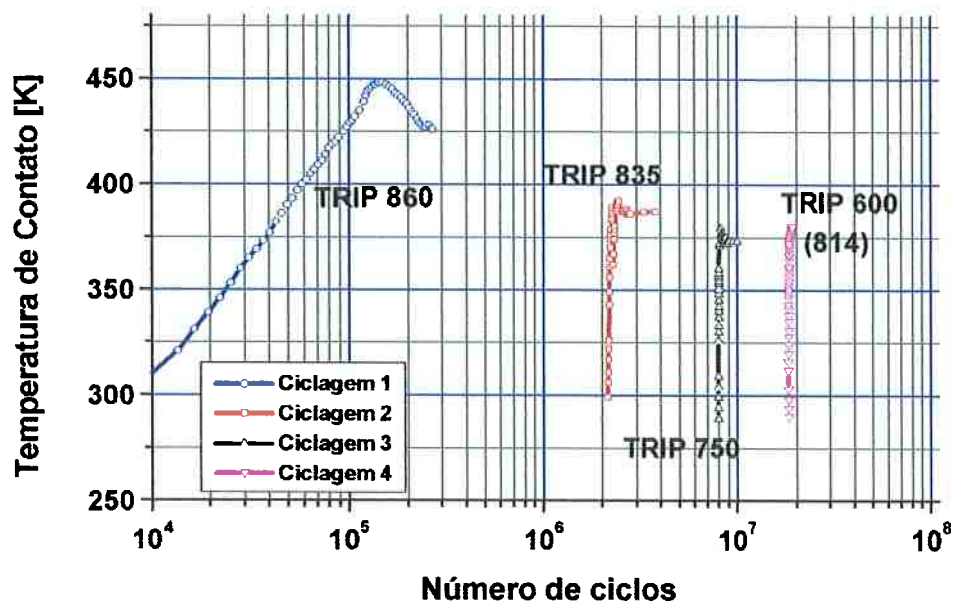
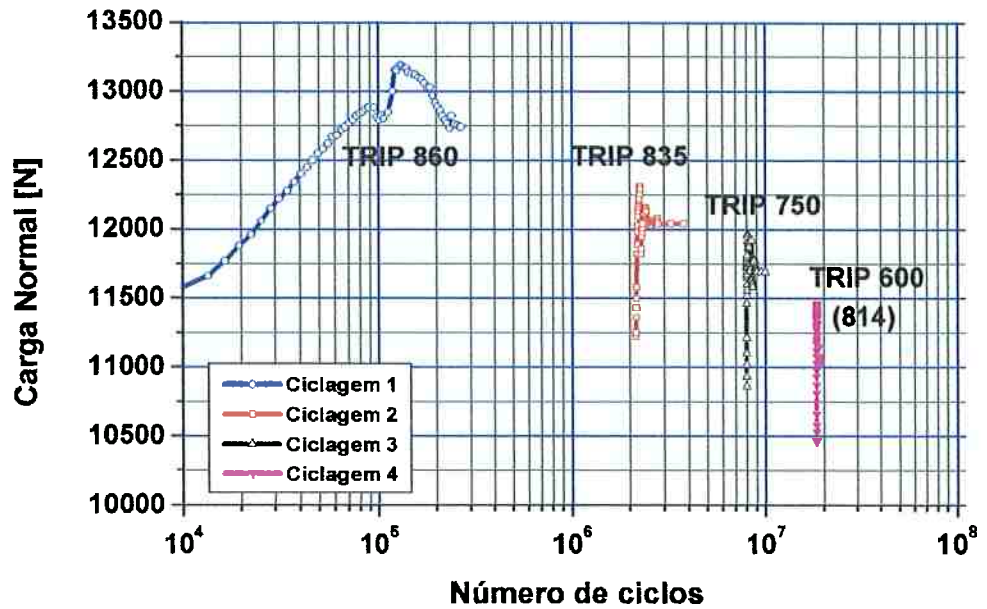


Figura 279. Evolução da umidade da sala e temperatura de contato durante o ensaio do par de discos de ADI 05 Nitretado (motor) e ADI 06 Nitretado (movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO ADI-ADI



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO ADI-ADI

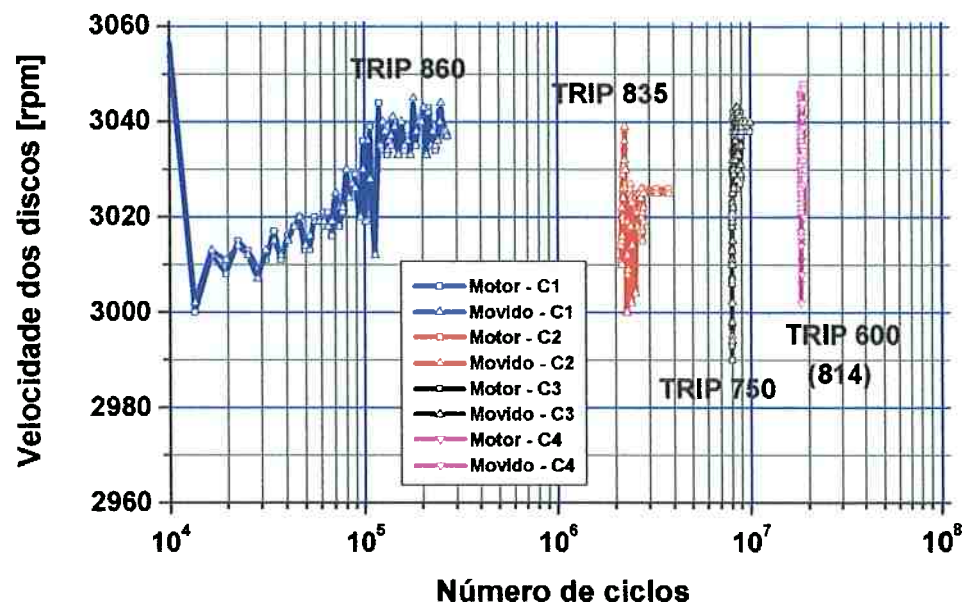
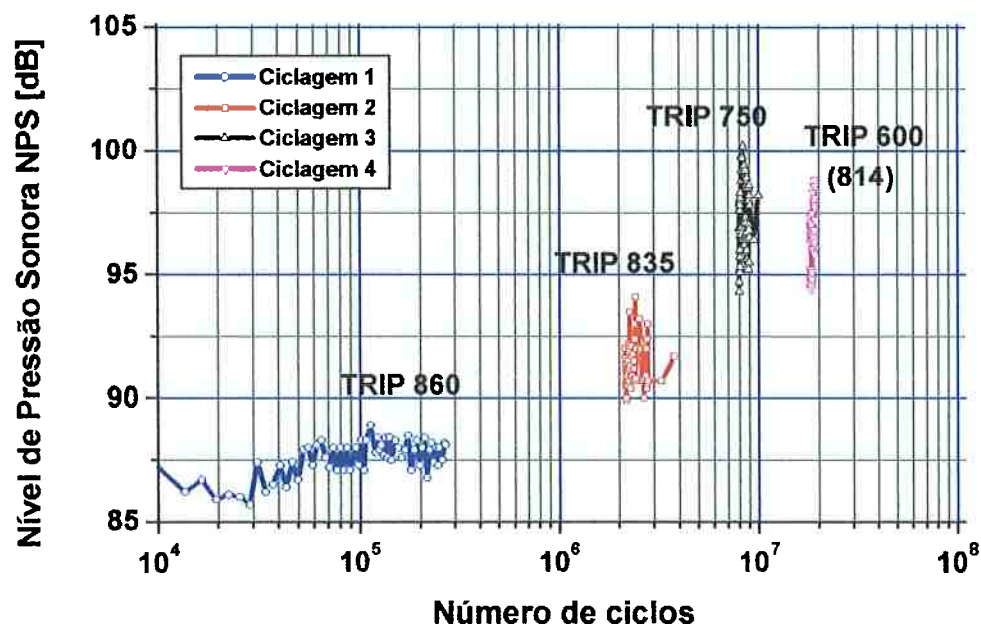


Figura 280. Evolução da carga normal de contato e velocidade durante o ensaio do par de discos de ADI 05 Nitretado (motor) e ADI 06 Nitretado (movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO ADI-ADI



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO ADI-ADI

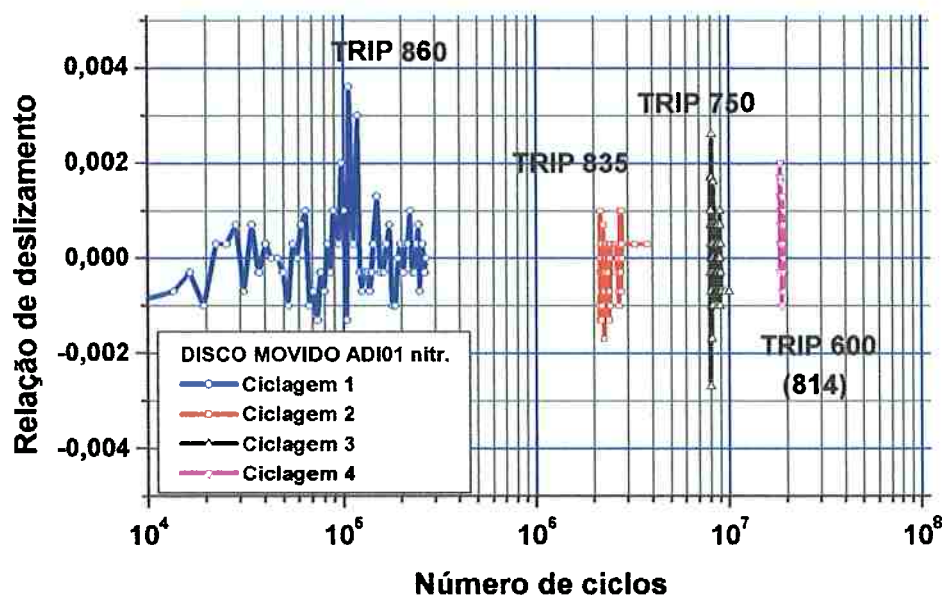
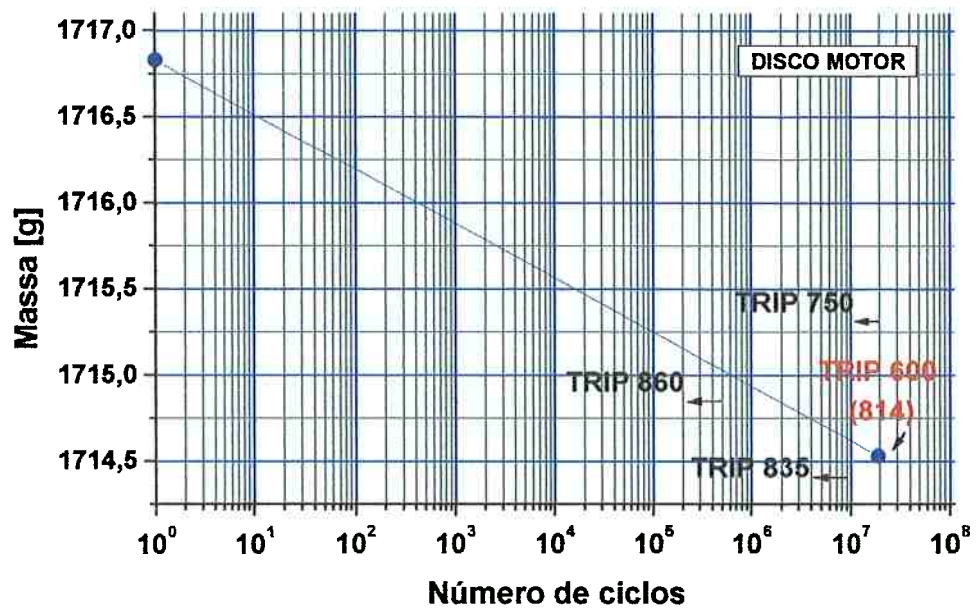


Figura 281. Evolução do Nível de Pressão Sonora e relação de deslizamento durante o par de discos de ADI 05 Nitretado (motor) e ADI 06 Nitretado (movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO ADI-ADI



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO ADI-ADI

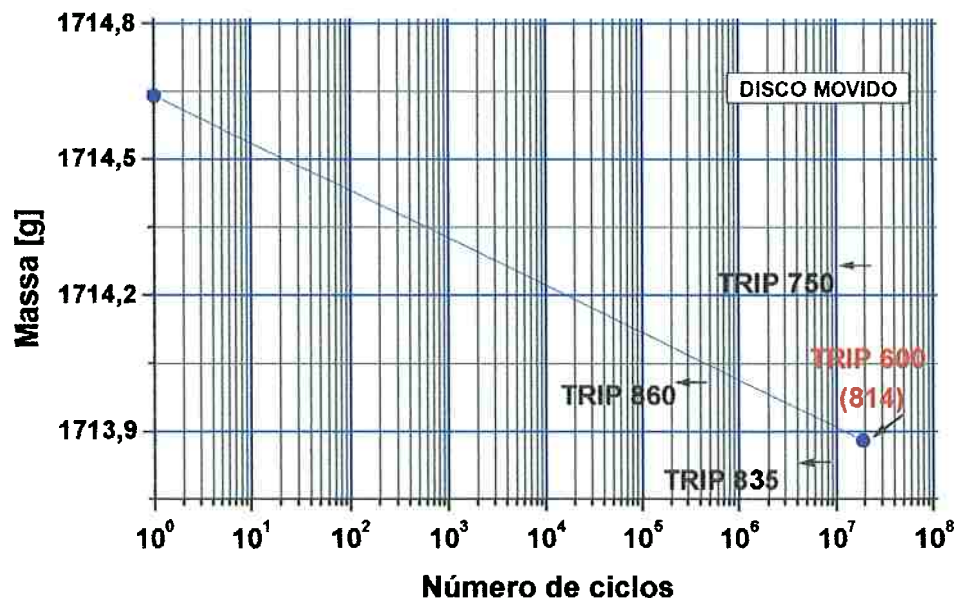
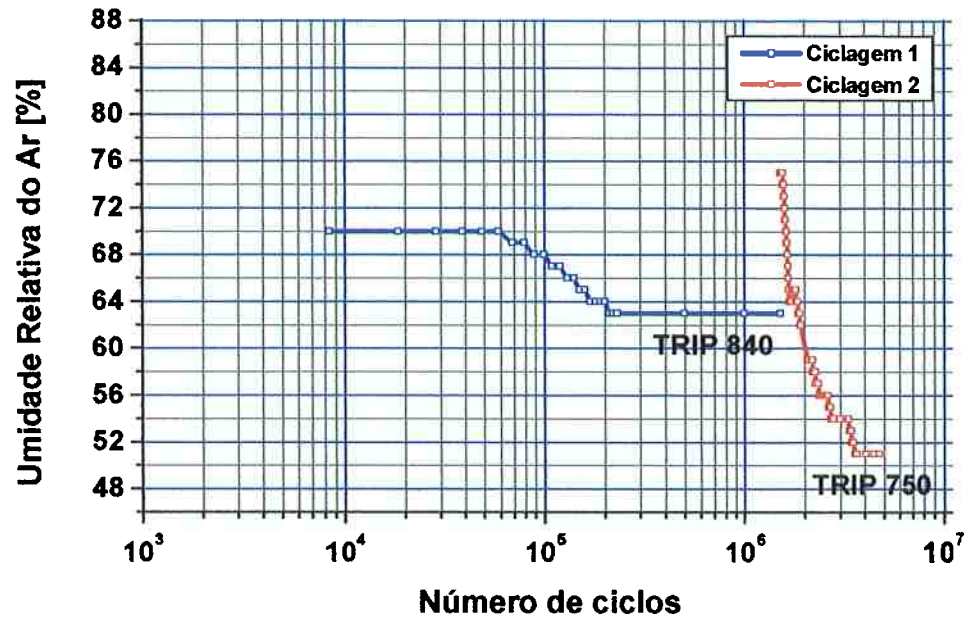


Figura 282. Evolução da perda de massa dos discos motor e movido durante o ensaio do par de discos de ADI 05 Nitretado (motor) e ADI 06 Nitretado (movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO ADI-ADI



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO ADI-ADI

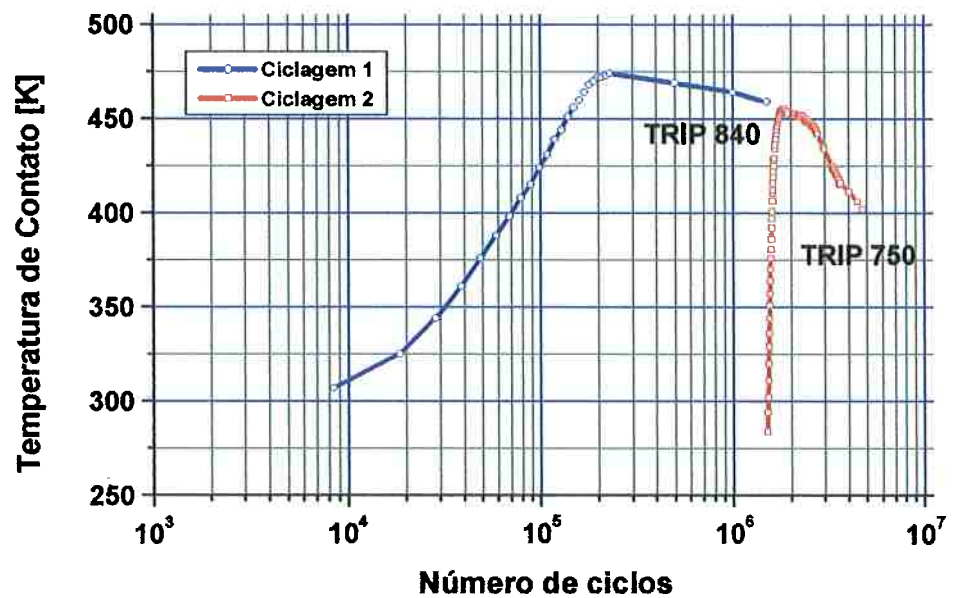
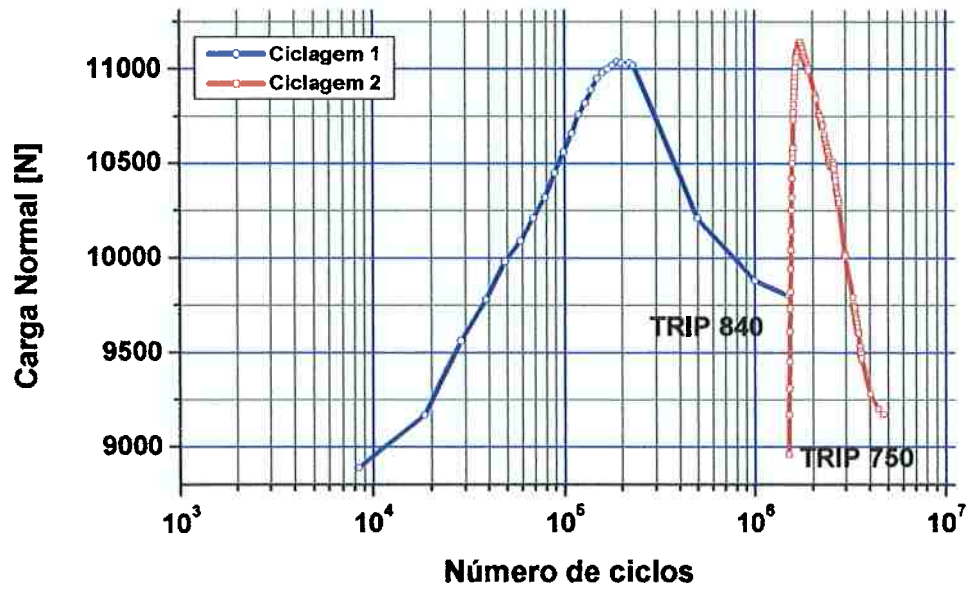


Figura 283. Evolução da umidade da sala e temperatura de contato durante o ensaio do par de discos de ADI 07 Nitretado (motor) e ADI 08 Nitretado (movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO ADI-ADI



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO ADI-ADI

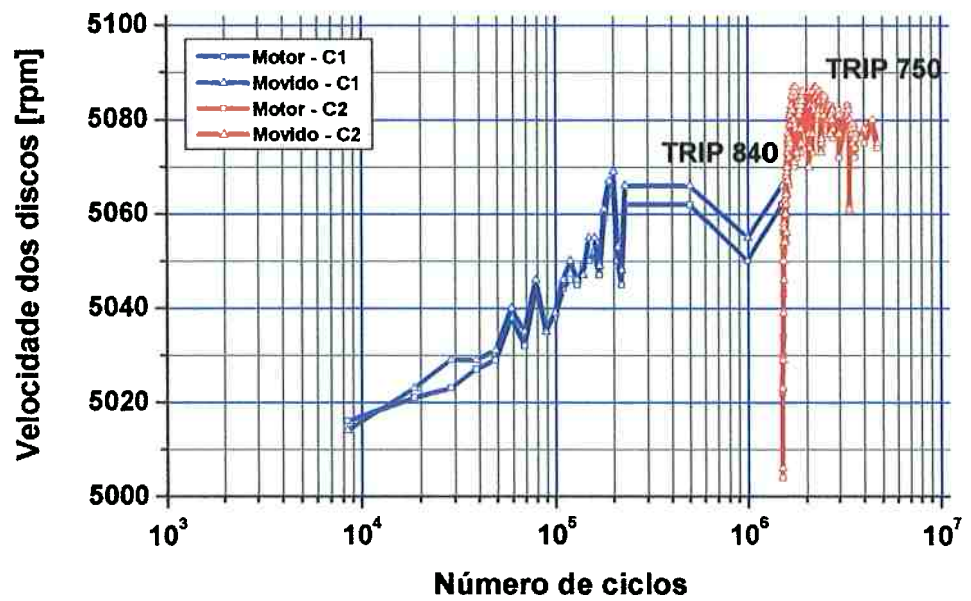
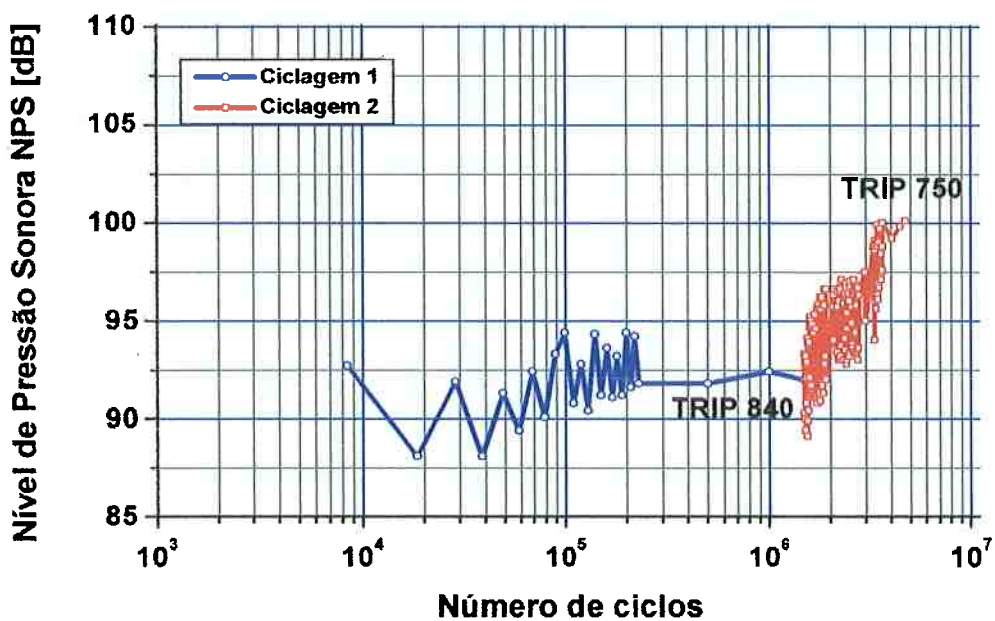


Figura 284. Evolução da carga normal de contato e velocidade durante o ensaio do par de discos de ADI 07 Nitretado (motor) e ADI 08 Nitretado (movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO ADI-ADI



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO ADI-ADI

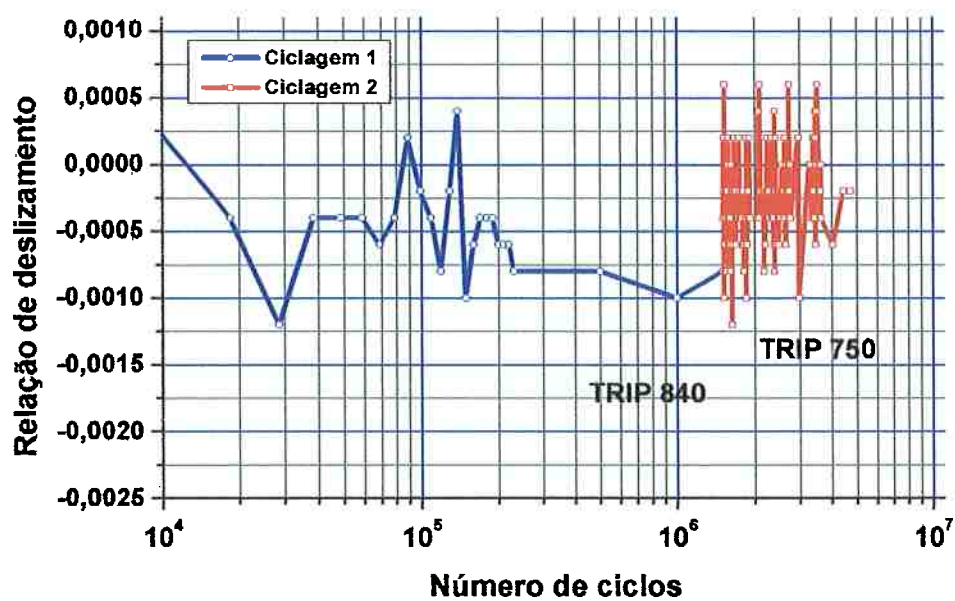
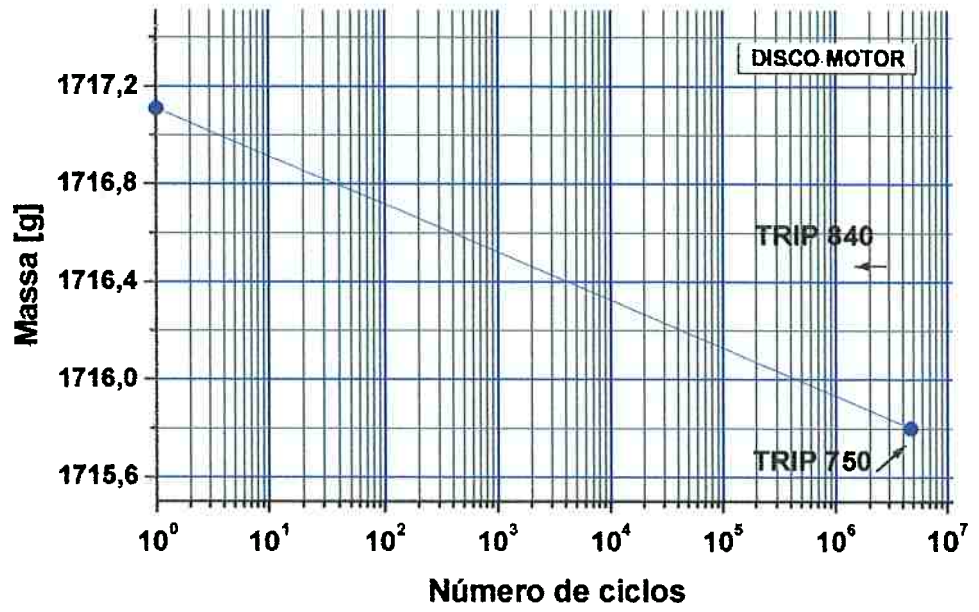


Figura 285. Evolução do Nível de Pressão Sonora e relação de deslizamento durante o par de discos de ADI 07 Nitretado (motor) e ADI 08 Nitretado (movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO ADI-ADI



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO ADI-ADI

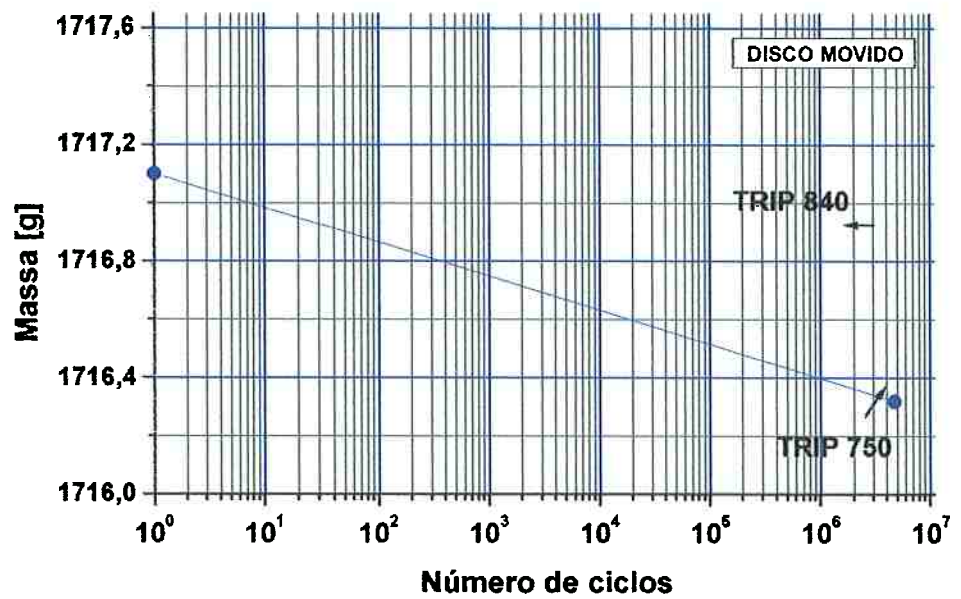


Figura 286. Evolução da perda de massa dos discos motor e movido durante o ensaio do par de discos de ADI 07 Nitretado (motor) e ADI 08 Nitretado (movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO ADI-ADI



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO ADI-ADI

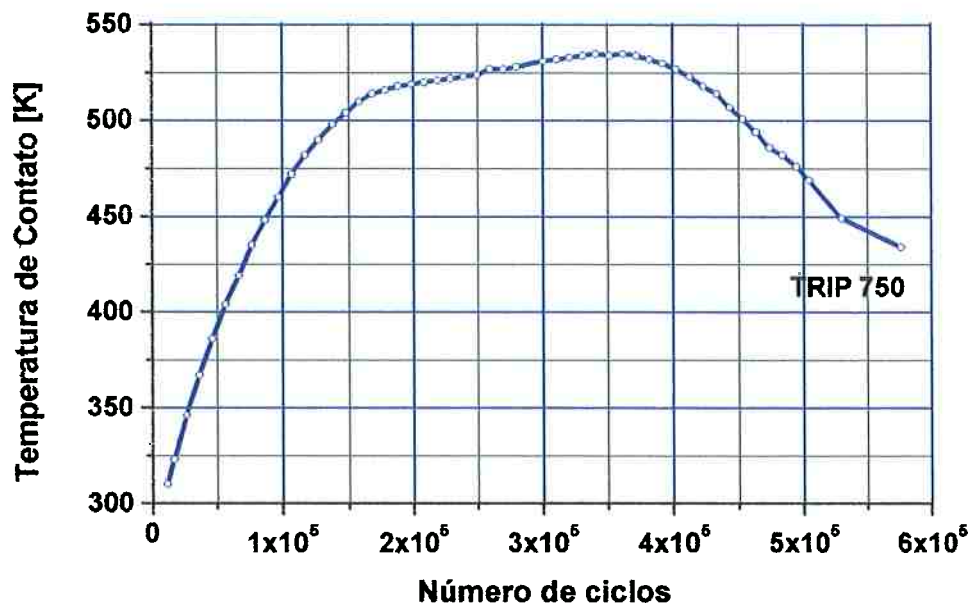


Figura 287. Evolução da umidade da sala e temperatura de contato durante o ensaio do par de discos de ADI 09 Nitretado (motor) e ADI 10 Nitretado (movido)

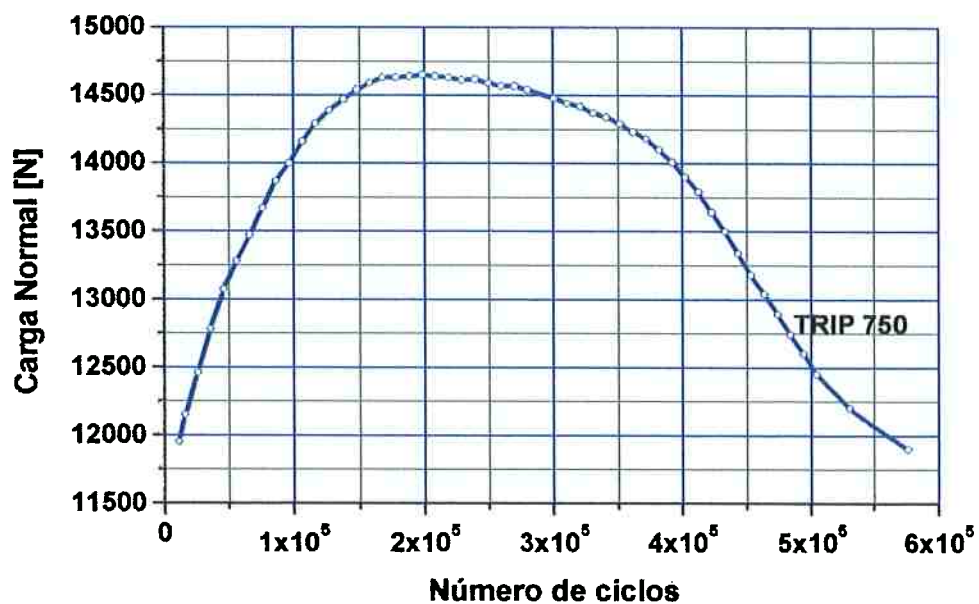
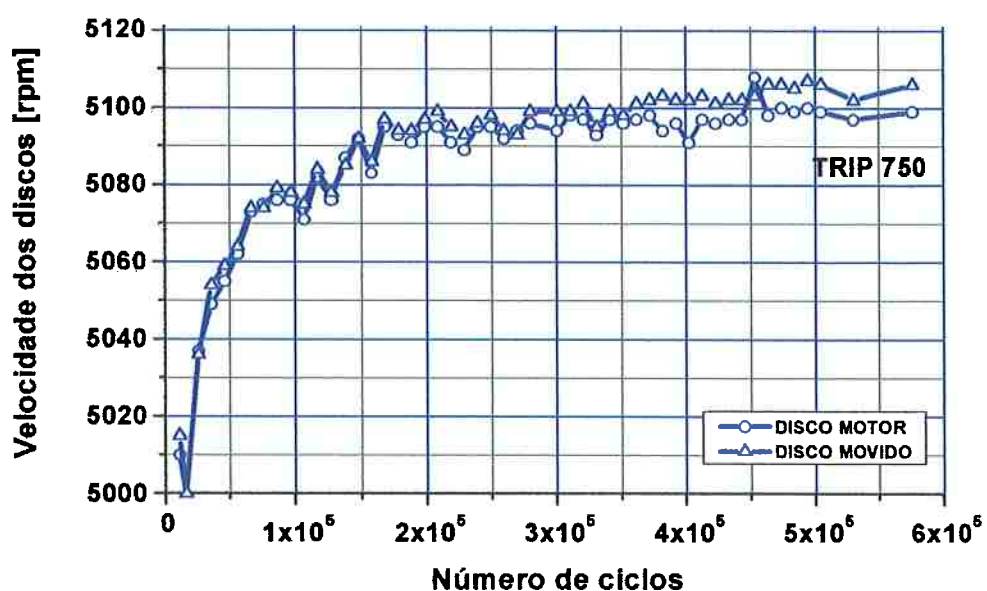
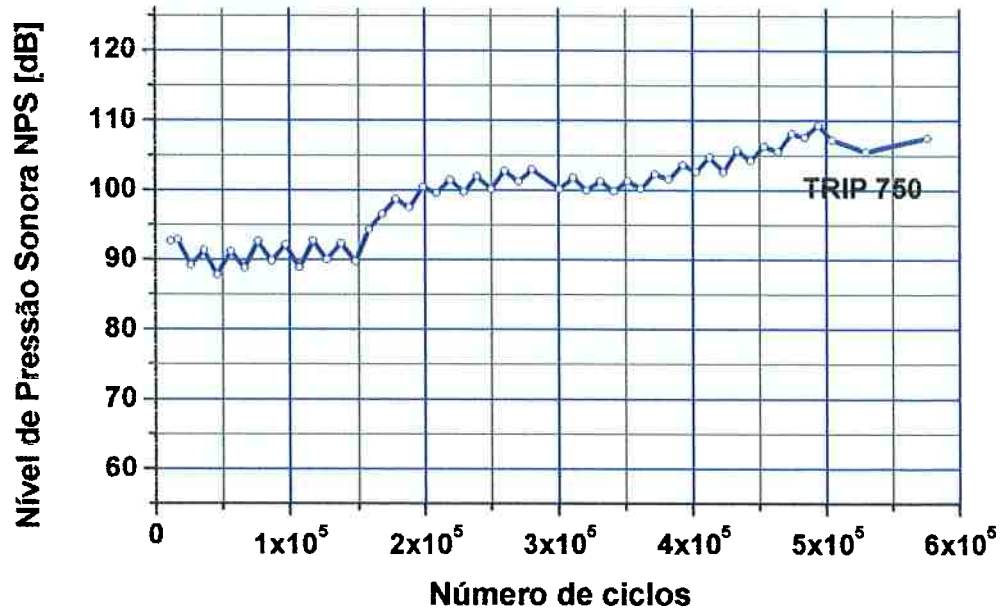
ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO ADI-ADI**ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO ADI-ADI**

Figura 288. Evolução da carga normal de contato e velocidade durante o ensaio do par de discos de ADI 09 Nitretado (motor) e ADI 10 Nitretado (movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO ADI-ADI



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO ADI-ADI

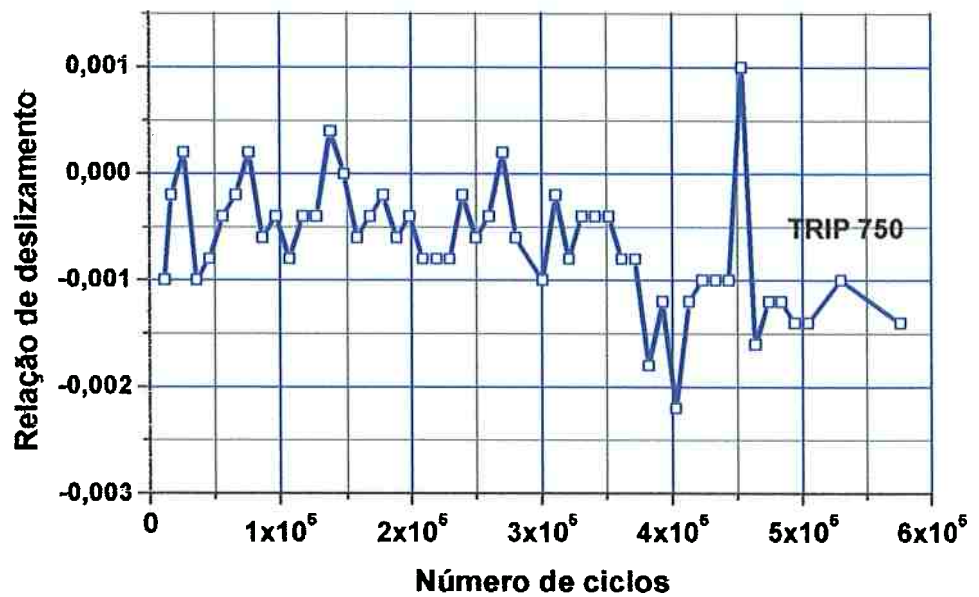
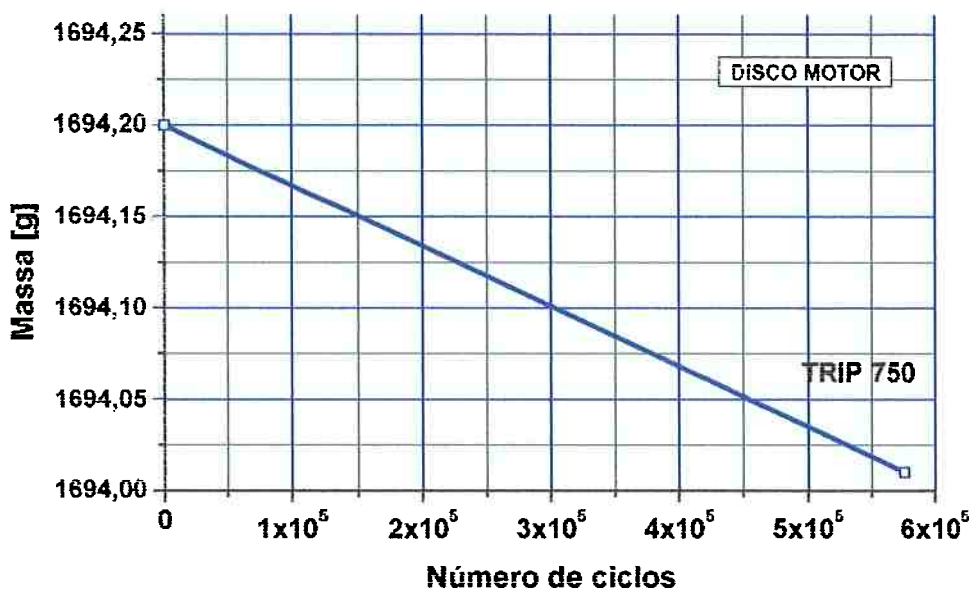


Figura 289. Evolução do Nível de Pressão Sonora e relação de deslizamento durante o par de discos de ADI 09 Nitretado (motor) e ADI 10 Nitretado (movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO ADI-ADI



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO ADI-ADI

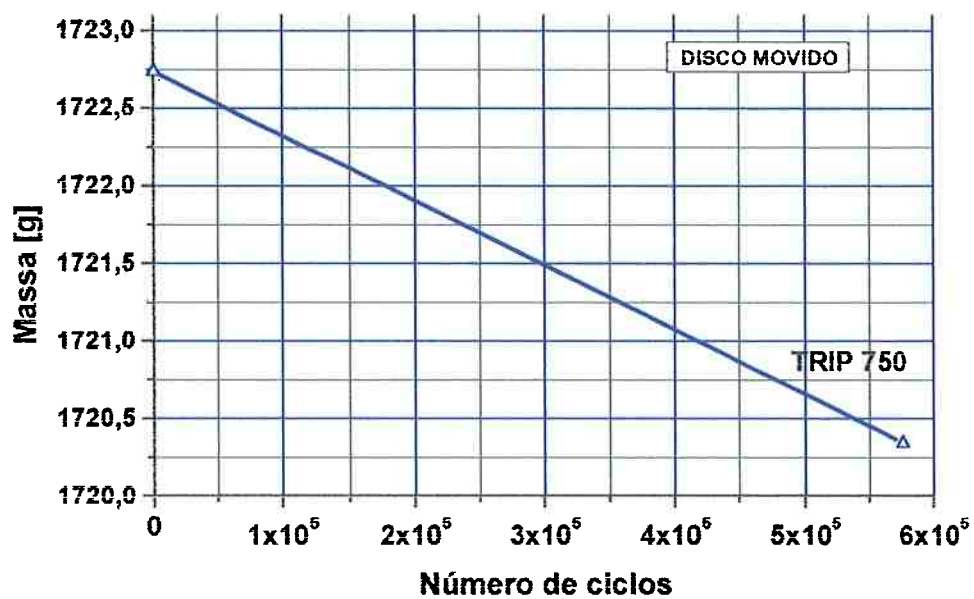
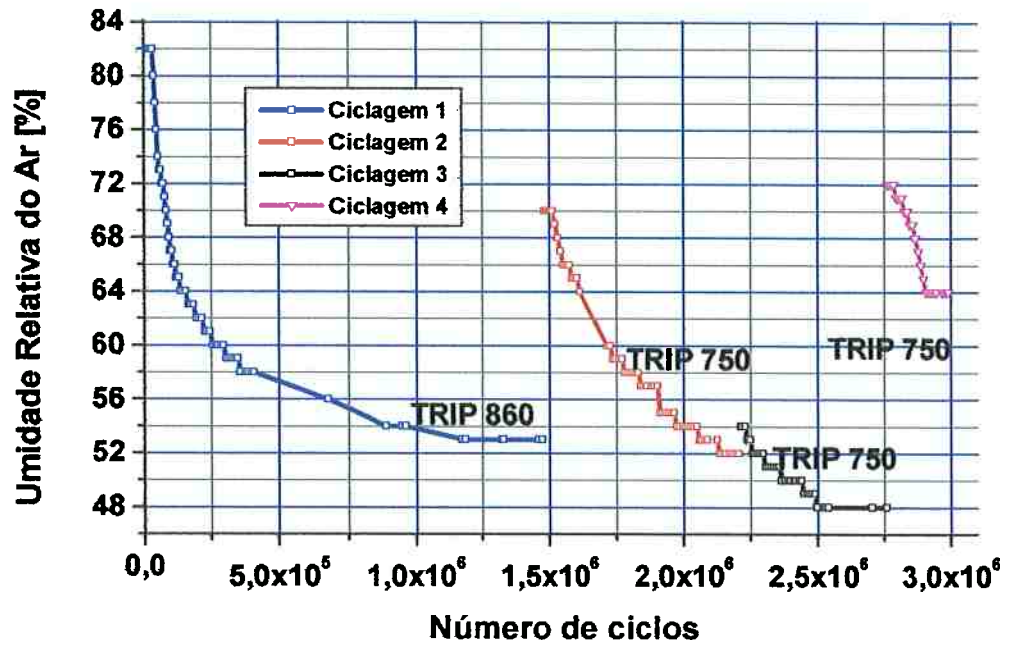


Figura 290. Evolução da perda de massa dos discos motor e movido durante o ensaio do par de discos de ADI 09 Nitretado (motor) e ADI 10 Nitretado (movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO ADI-ADI



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO ADI-ADI

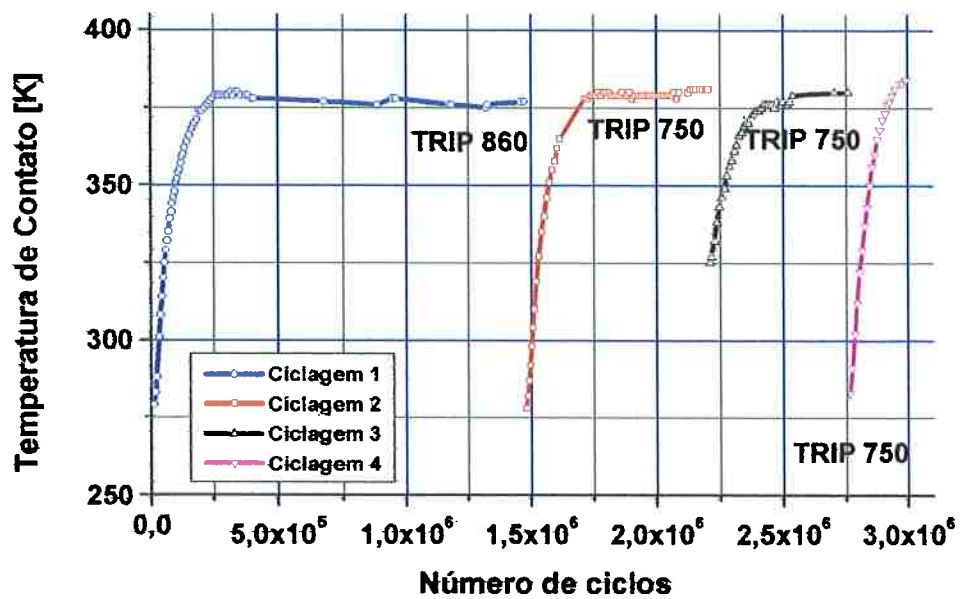
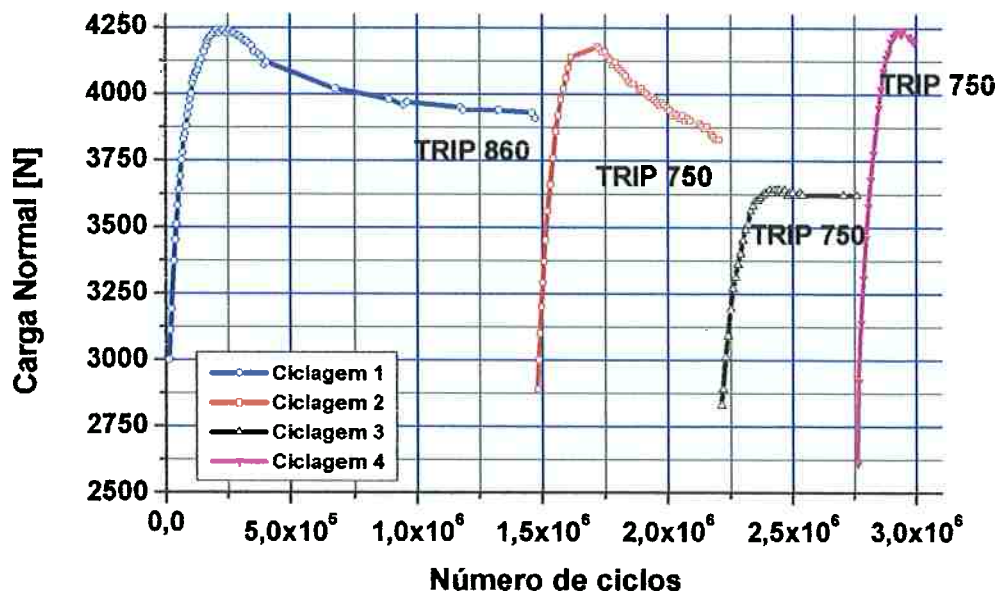


Figura 291. Evolução da umidade da sala e temperatura de contato durante o ensaio do par de discos de ADI 11 Nitretado (motor) e ADI 12 Nitretado (movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO ADI-ADI



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO ADI-ADI

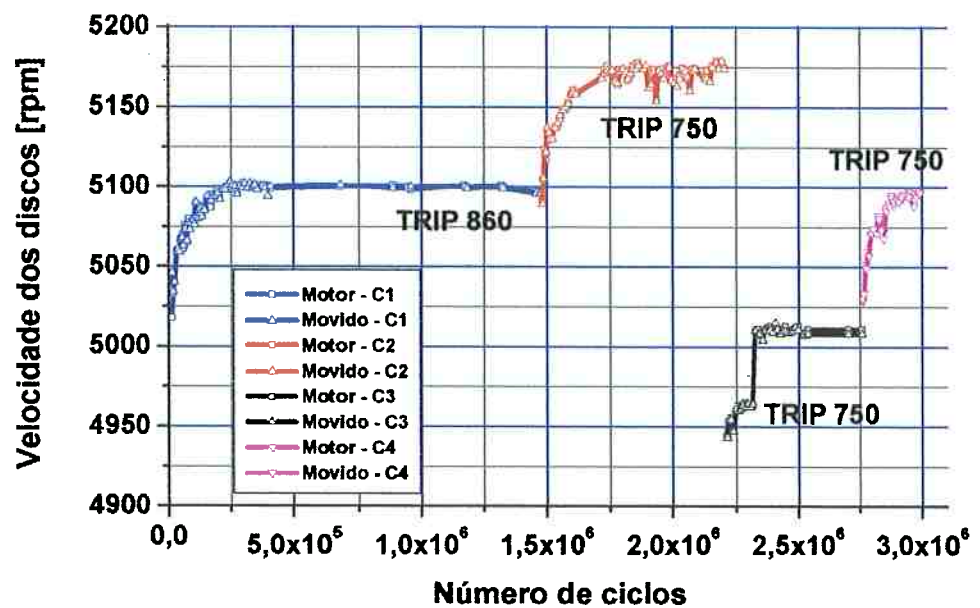
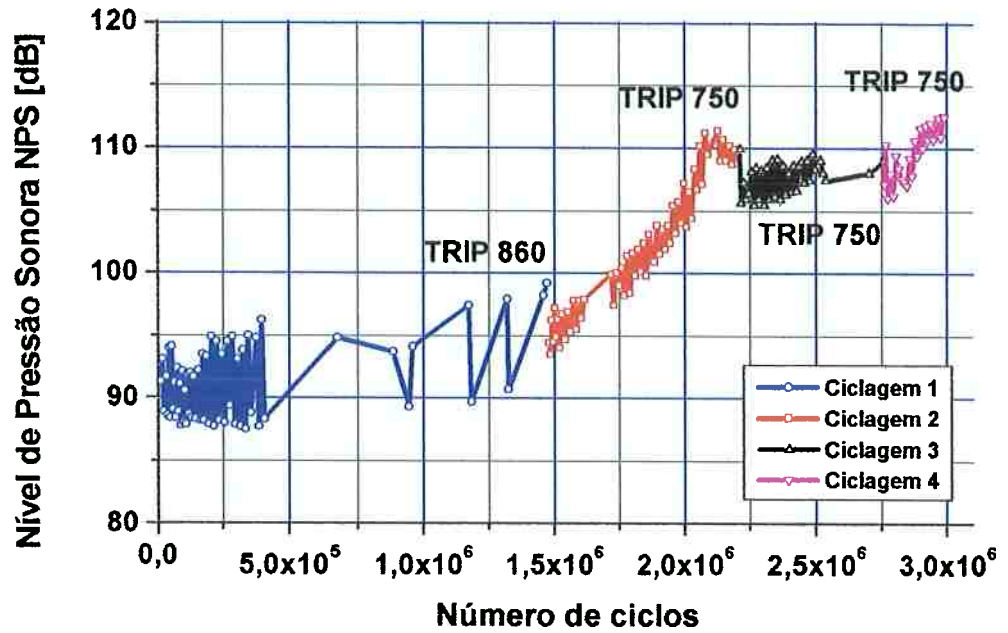


Figura 292. Evolução da carga normal de contato e velocidade durante o ensaio do par de discos de ADI 11 Nitretado (motor) e ADI 12 Nitretado (movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO ADI-ADI



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO ADI-ADI

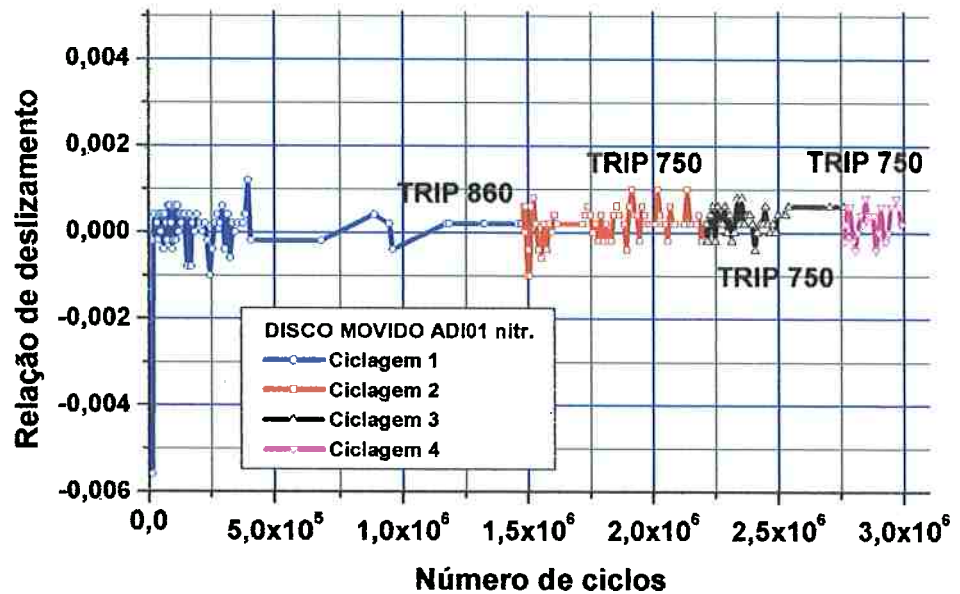
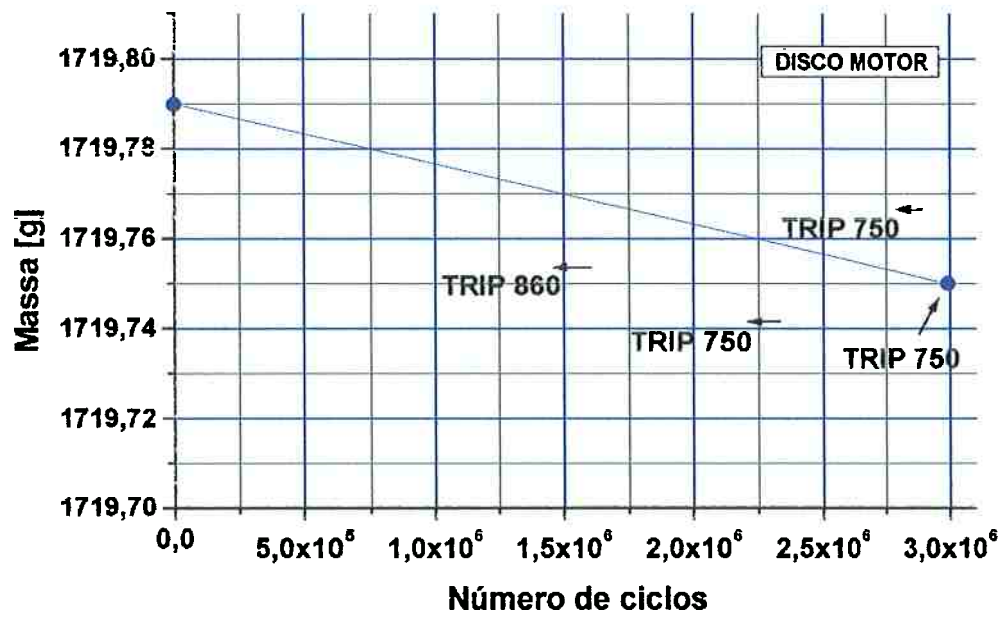


Figura 293. Evolução do Nível de Pressão Sonora e relação de deslizamento durante o par de discos de ADI 11 Nitretado (motor) e ADI 12 Nitretado (movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO ADI-ADI



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO ADI-ADI

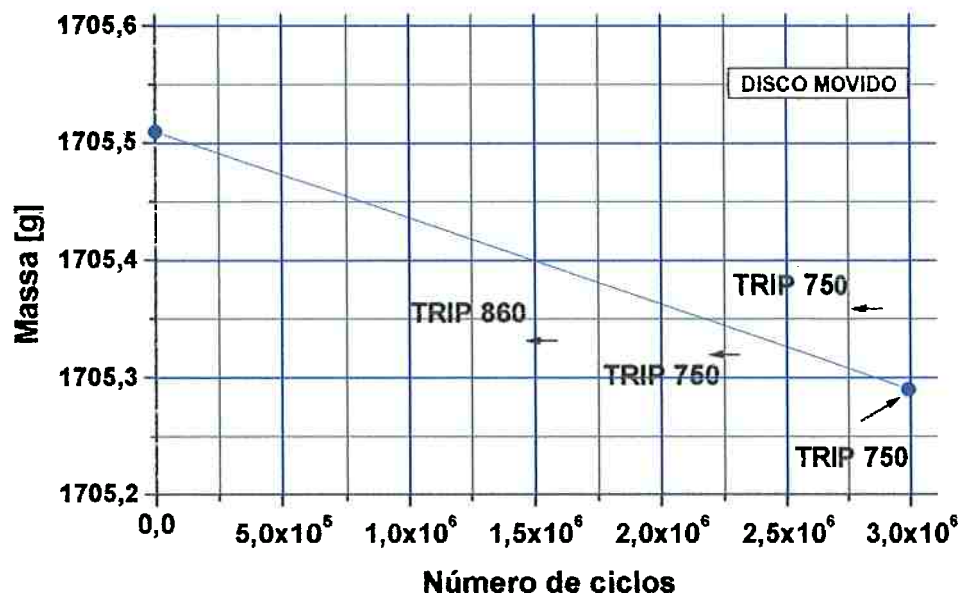
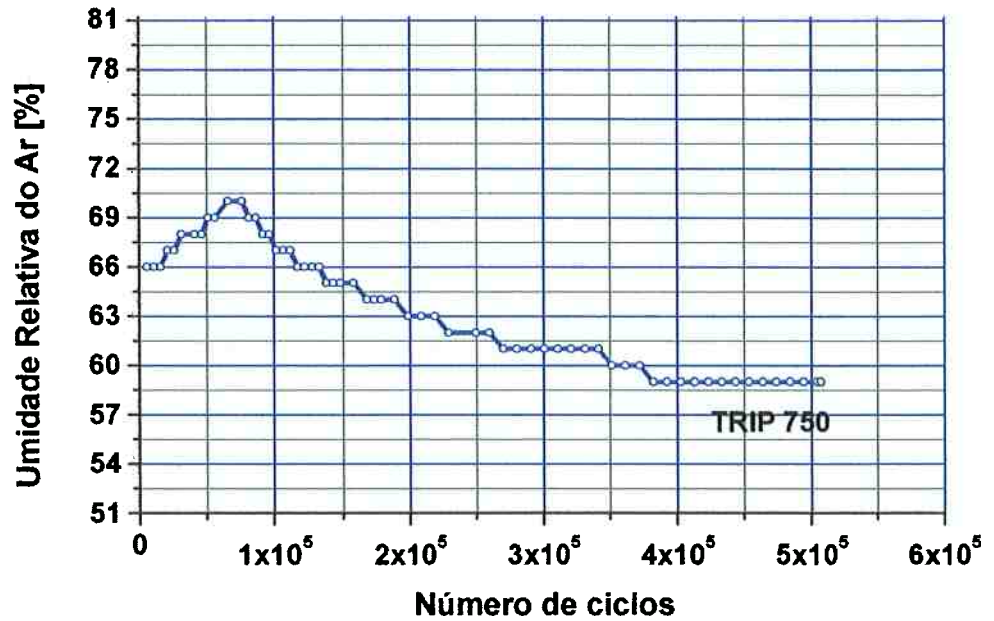


Figura 294. Evolução da perda de massa dos discos motor e movido durante o ensaio do par de discos de ADI 11 Nitretado (motor) e ADI 12 Nitretado (movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO ADI-ADI



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO ADI-ADI

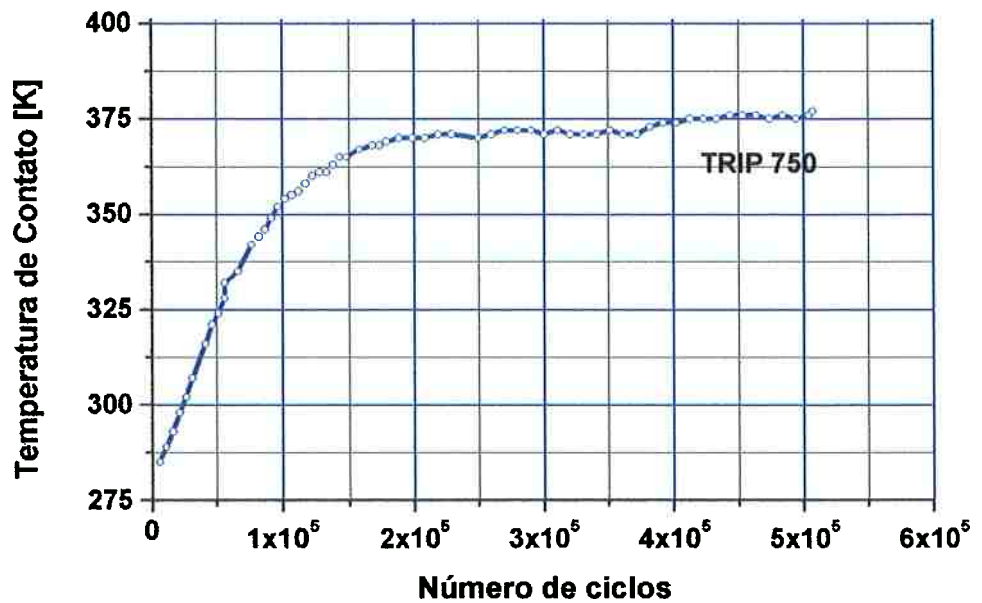
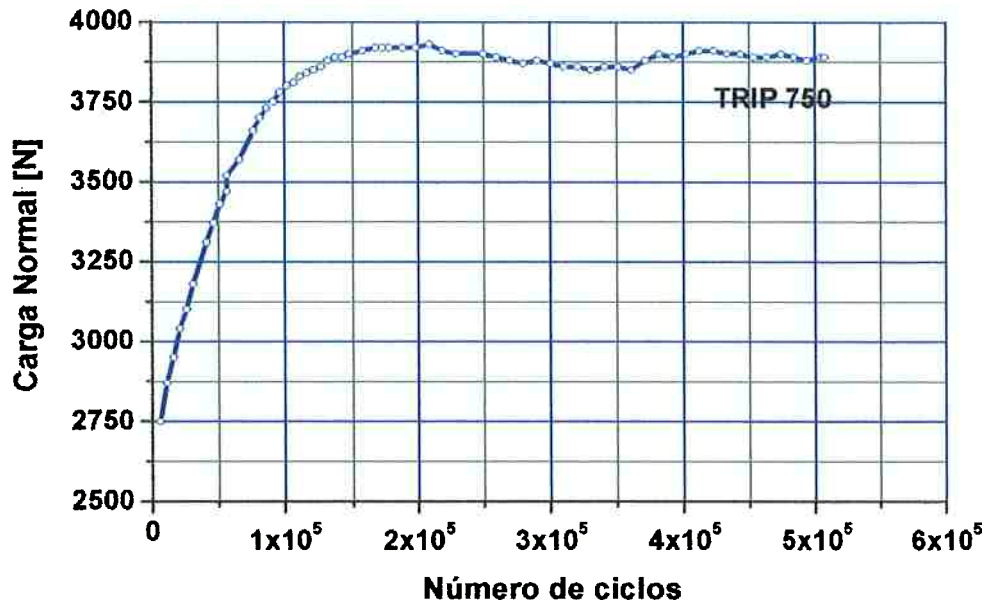


Figura 295. Evolução da umidade da sala e temperatura de contato durante o ensaio do par de discos de ADI 14 Nitretado (motor) e ADI 15 Nitretado (movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO ADI-ADI



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO ADI-ADI

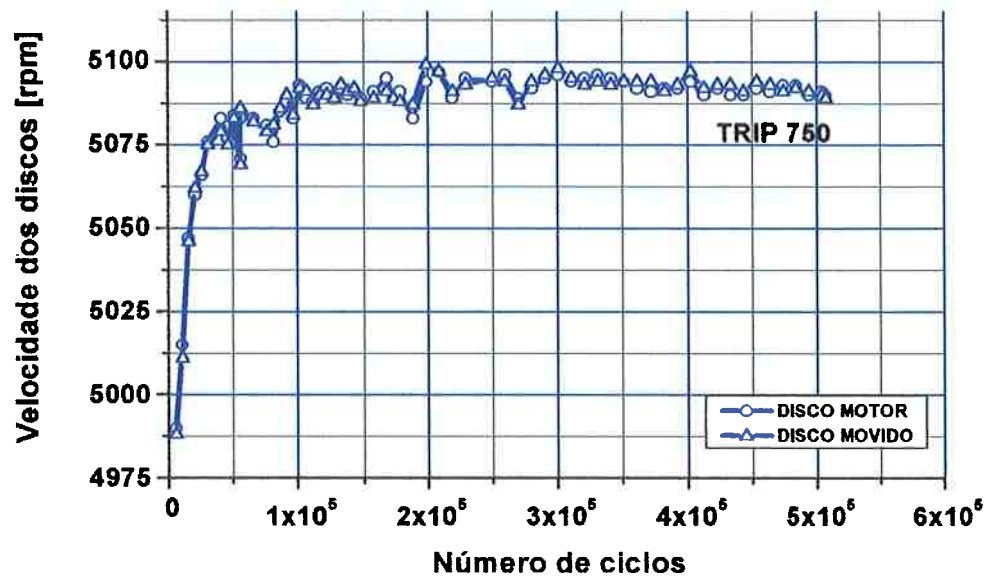
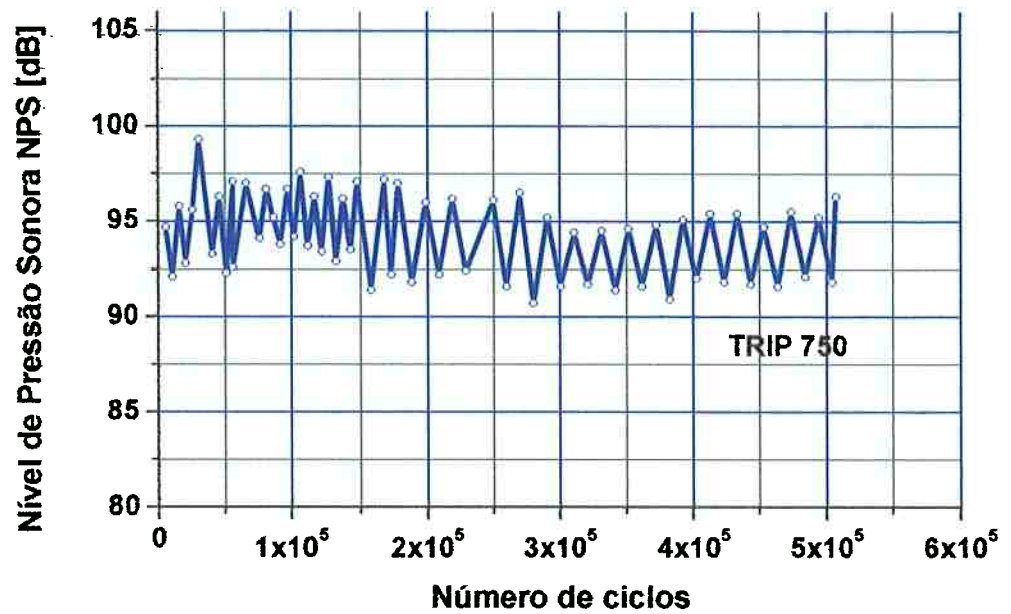


Figura 296. Evolução da carga normal de contato e velocidade durante o ensaio do par de discos de ADI 14 Nitretado (motor) e ADI 15 Nitretado (movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO ADI-ADI



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO ADI-ADI

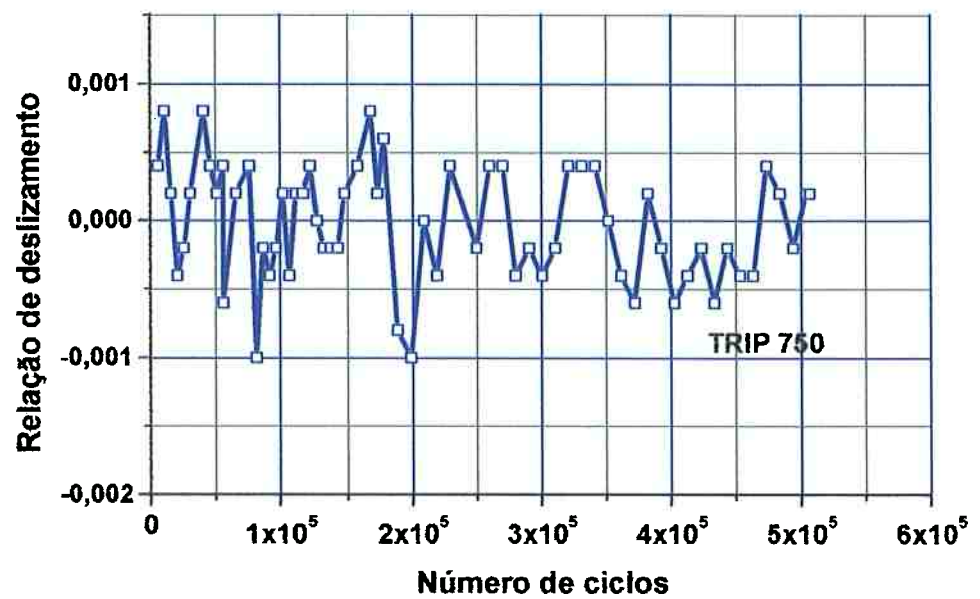
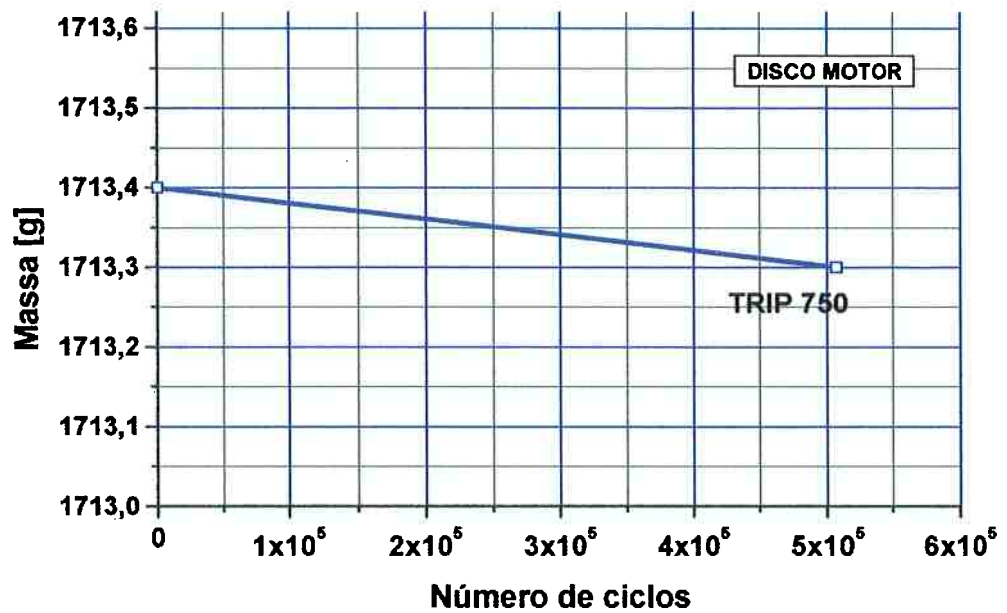


Figura 297. Evolução do Nível de Pressão Sonora e relação de deslizamento durante o par de discos de ADI 14 Nitretado (motor) e ADI 15 Nitretado (movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO ADI-ADI



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO ADI-ADI

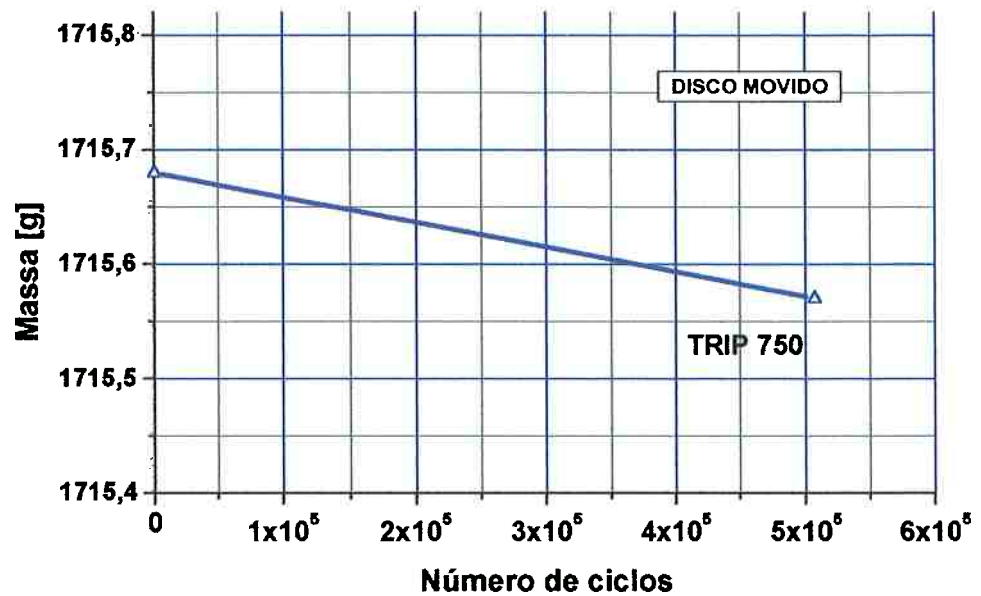
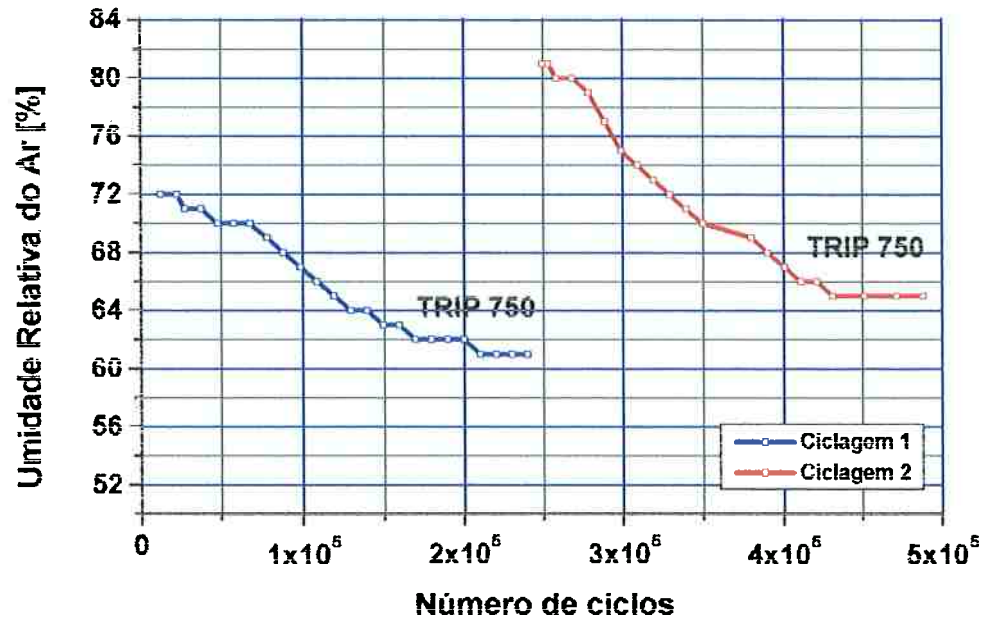


Figura 298. Evolução da perda de massa dos discos motor e movido durante o ensaio do par de discos de ADI 14 Nitretado (motor) e ADI 15 Nitretado (movido)



Figura 299. Trilha na pista de contato de rolamento (“*footprint*” [ing.]) do disco de ferro fundido austemperado nitretado ADI 15 (movido), após 0,51 milhão de ciclos rolando por atrito contra o disco ADI 14

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO ADI-ADI



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO ADI-ADI

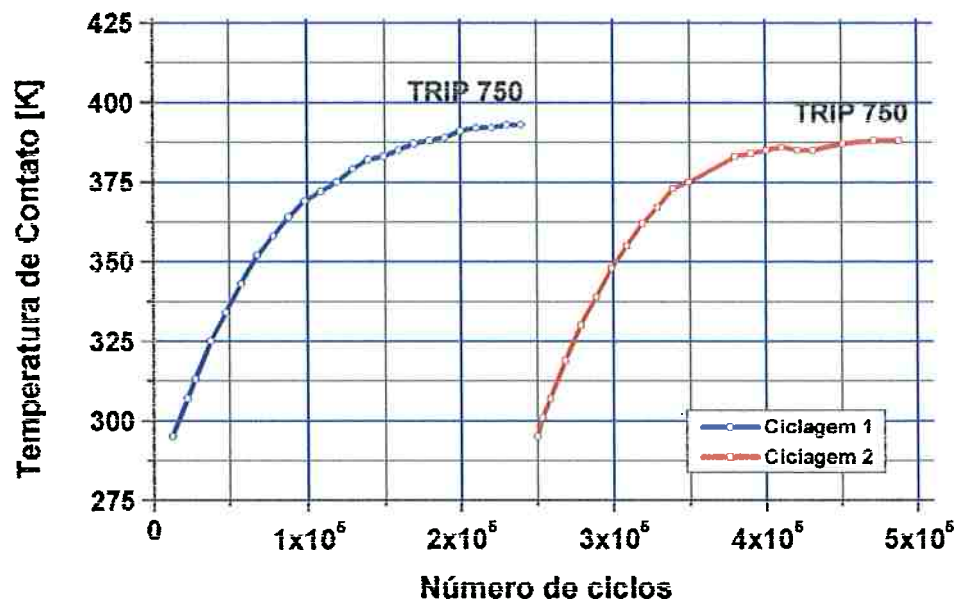
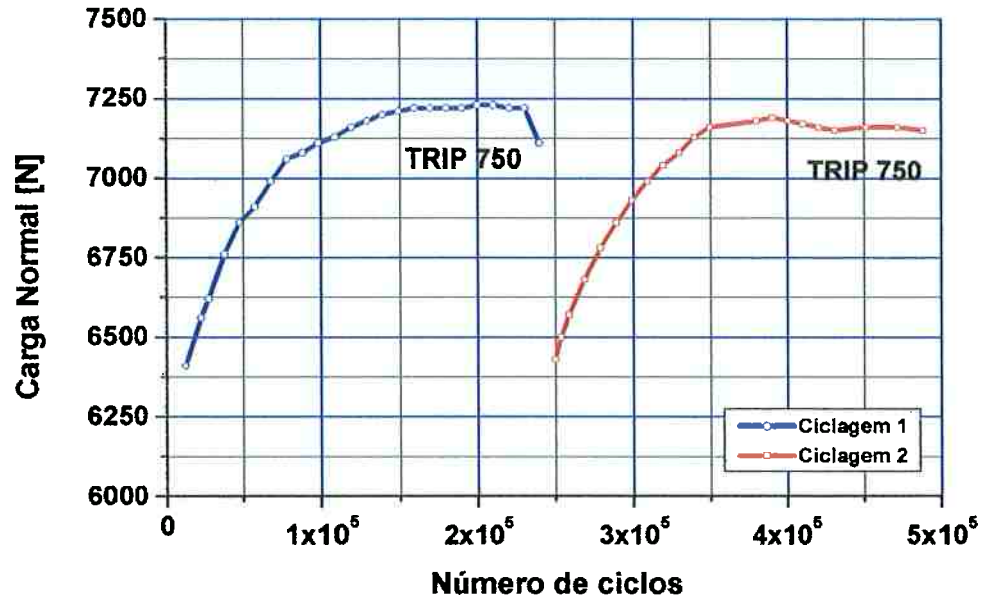


Figura 300. Evolução da umidade da sala e temperatura de contato durante o ensaio do par de discos não-nitretados de ADI 19 (motor) e ADI 20 (movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO ADI-ADI



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO ADI-ADI

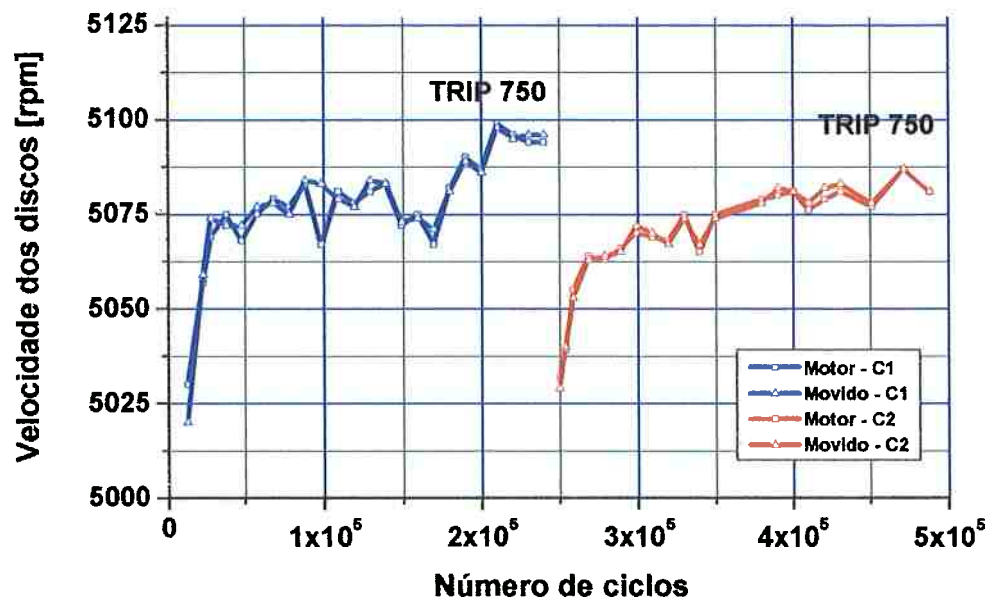
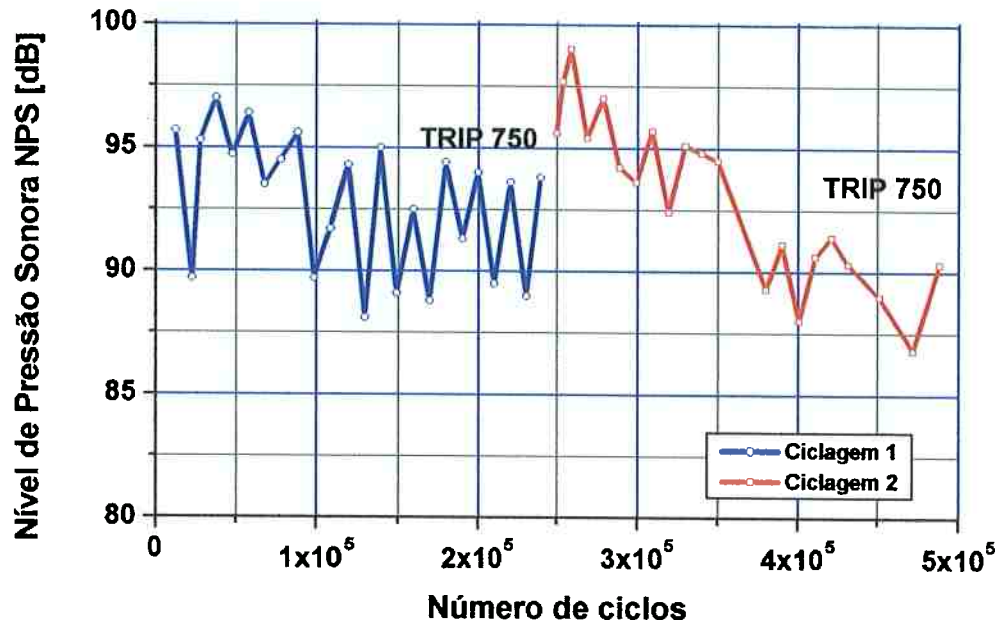


Figura 301. Evolução da carga normal de contato e velocidade durante o ensaio do par de discos não-nitretados de ADI 19 (motor) e ADI 20 (movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO ADI-ADI



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO ADI-ADI

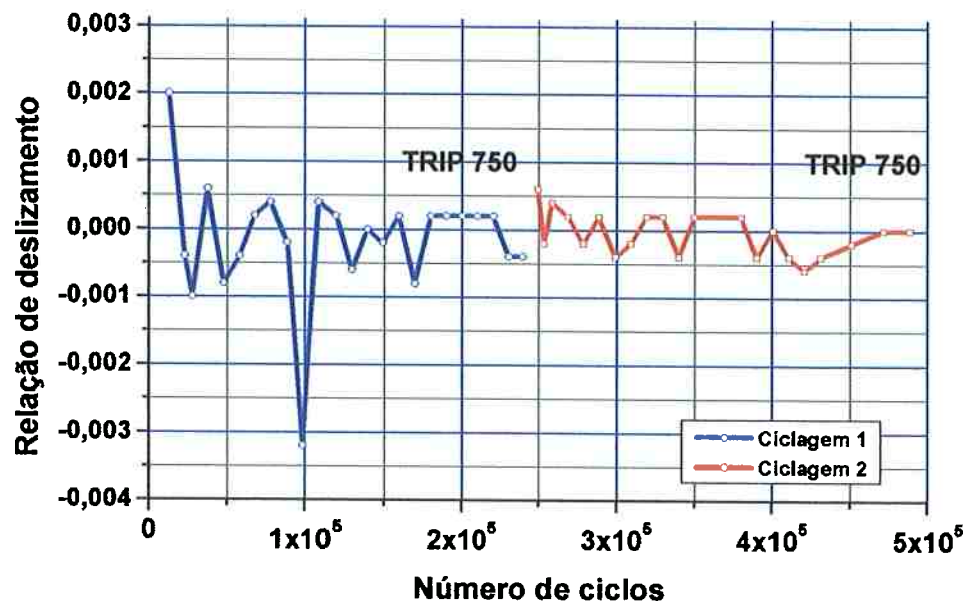


Figura 302. Evolução do Nível de Pressão Sonora e relação de deslizamento durante o par de discos não-nitretados de ADI 19 (motor) e ADI 20 (movido)

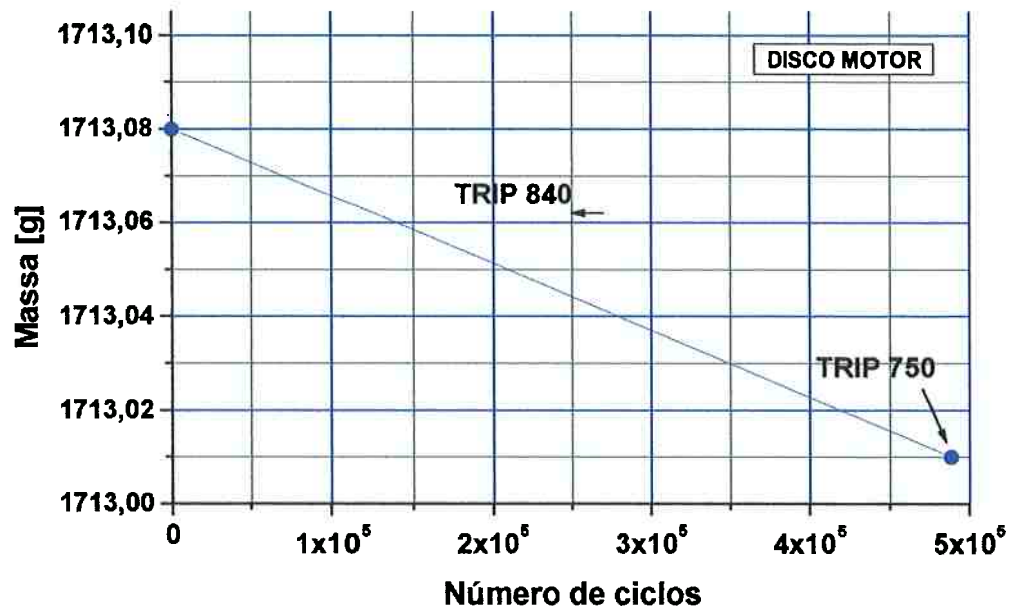
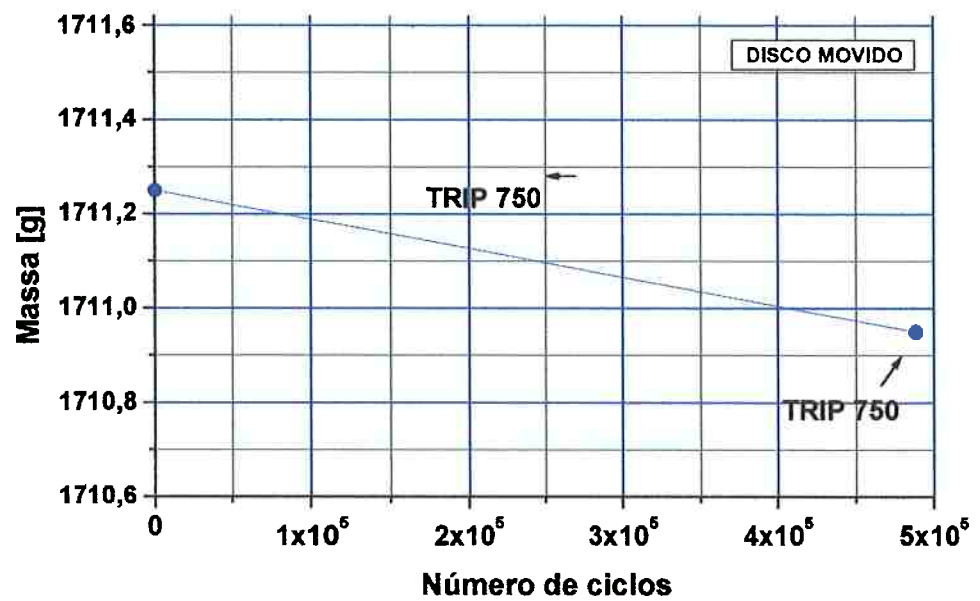
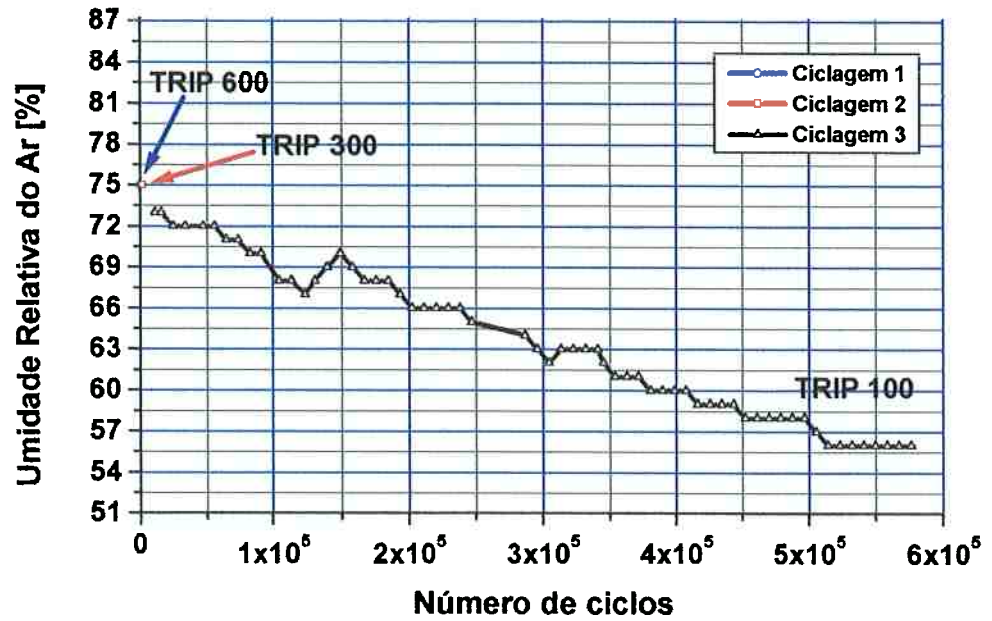
ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO ADI-ADI**ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO ADI-ADI**

Figura 303. Evolução da perda de massa dos discos motor e movido durante o ensaio do par de discos não-nitretados de ADI 19 (motor) e ADI 20 (movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO COBRE-AÇO



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO COBRE-AÇO

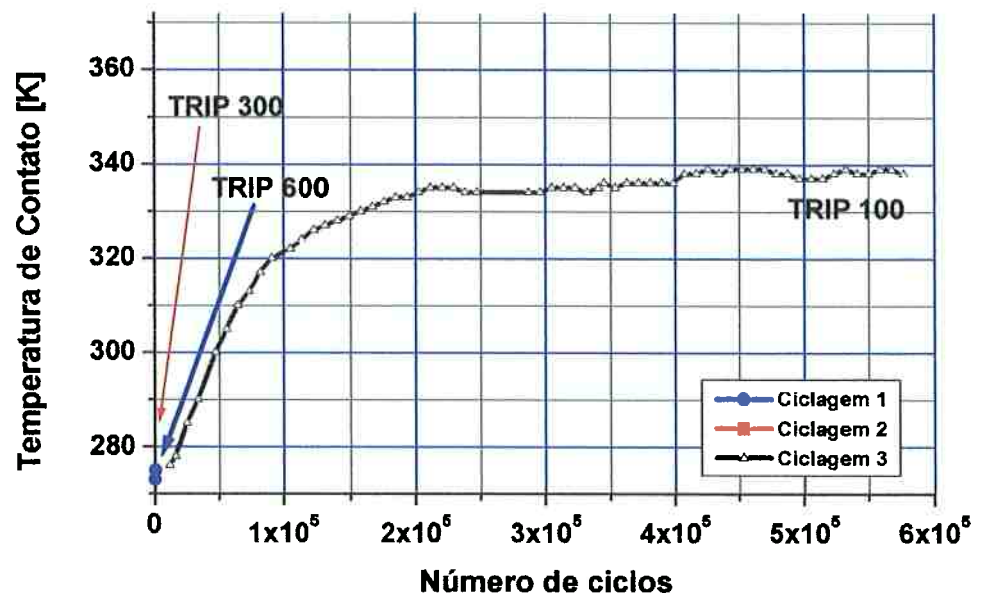
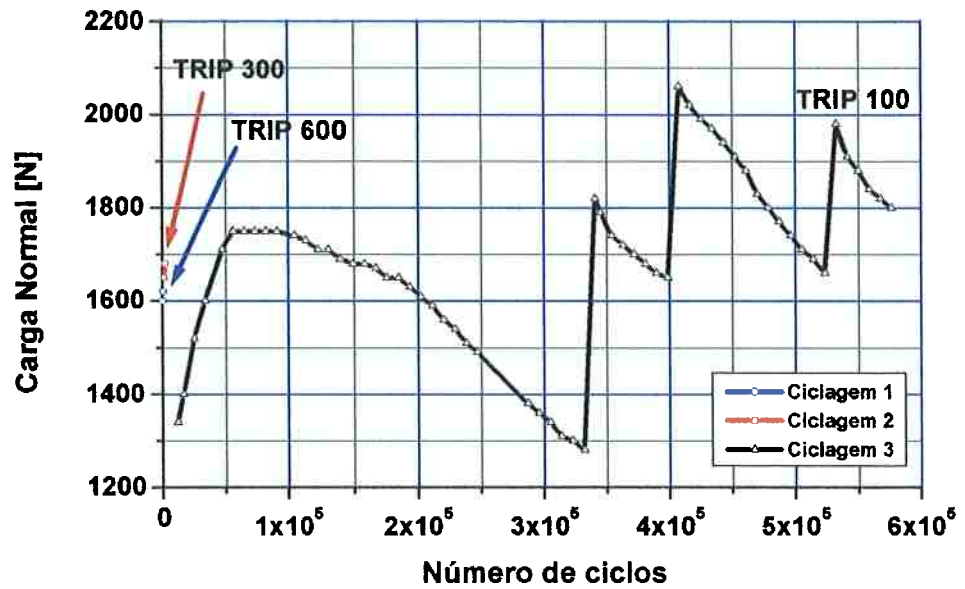


Figura 304. Evolução da umidade da sala e temperatura de contato durante o ensaio do par de discos de Cobre C01 (motor) e Aço ER85mrv (movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO COBRE-AÇO



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO COBRE-AÇO

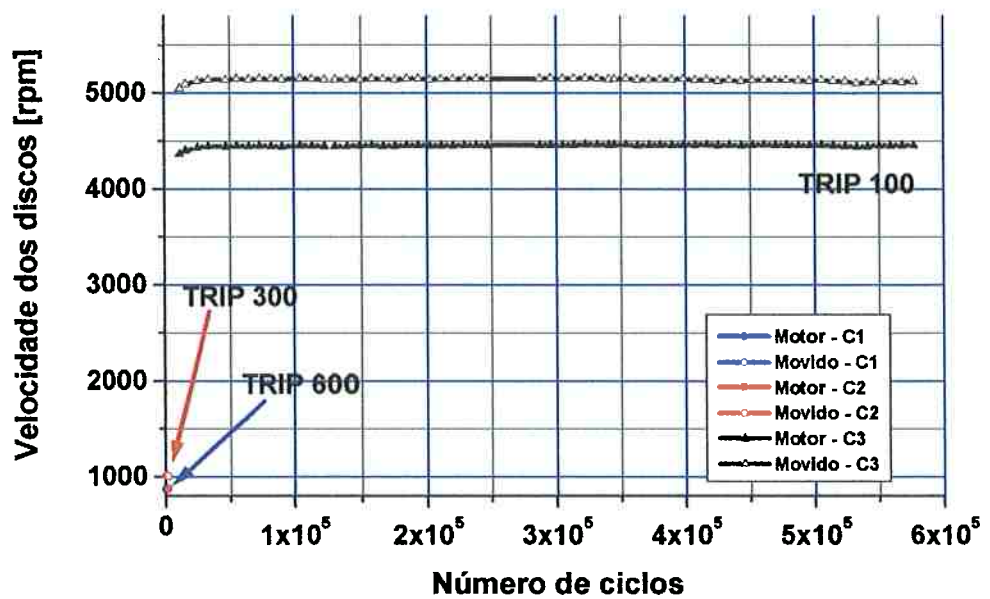
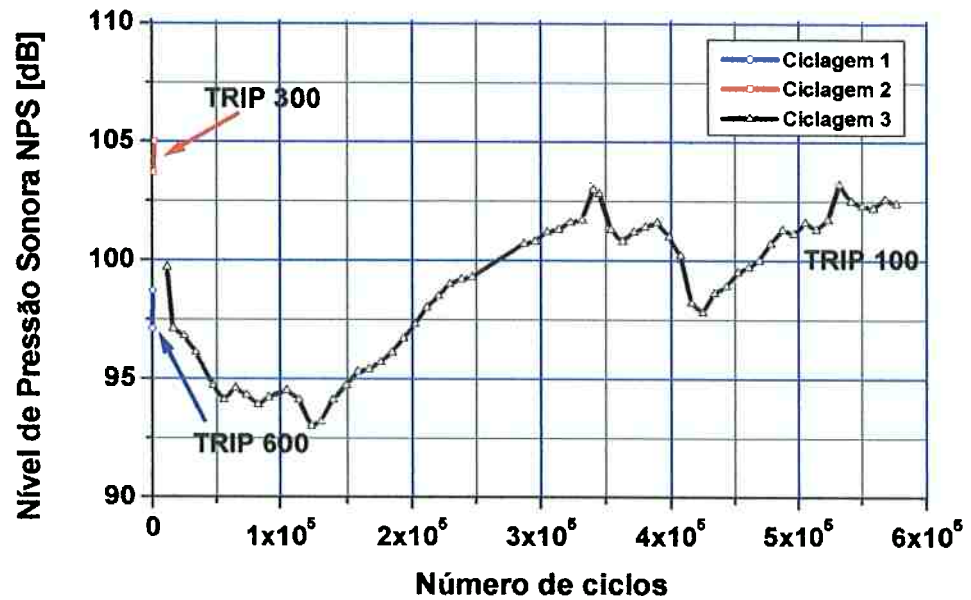


Figura 305. Evolução da carga normal de contato e velocidade durante o ensaio do par de discos de Cobre C01 (motor) e Aço ER85mrv (movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO COBRE-AÇO



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO COBRE-AÇO

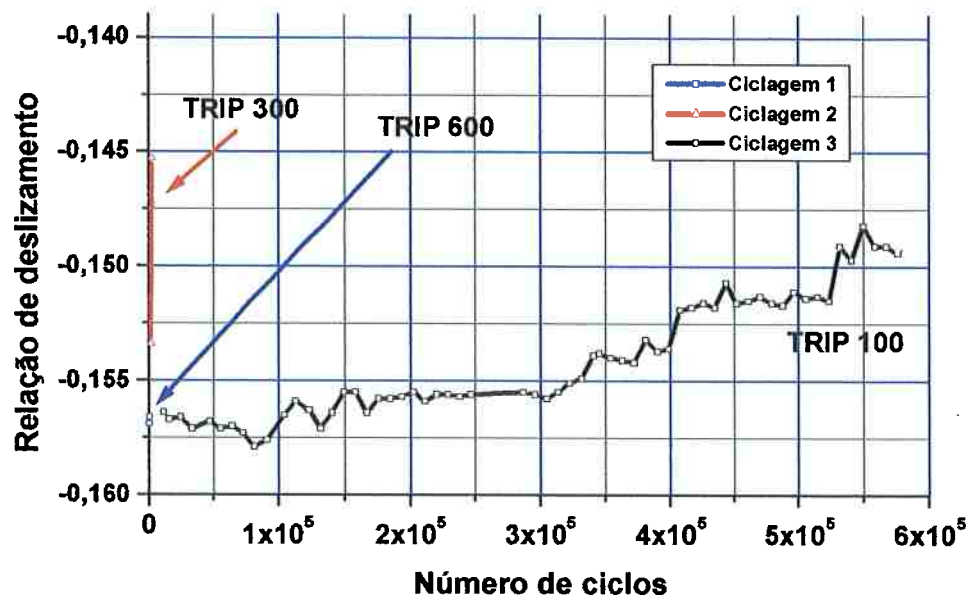
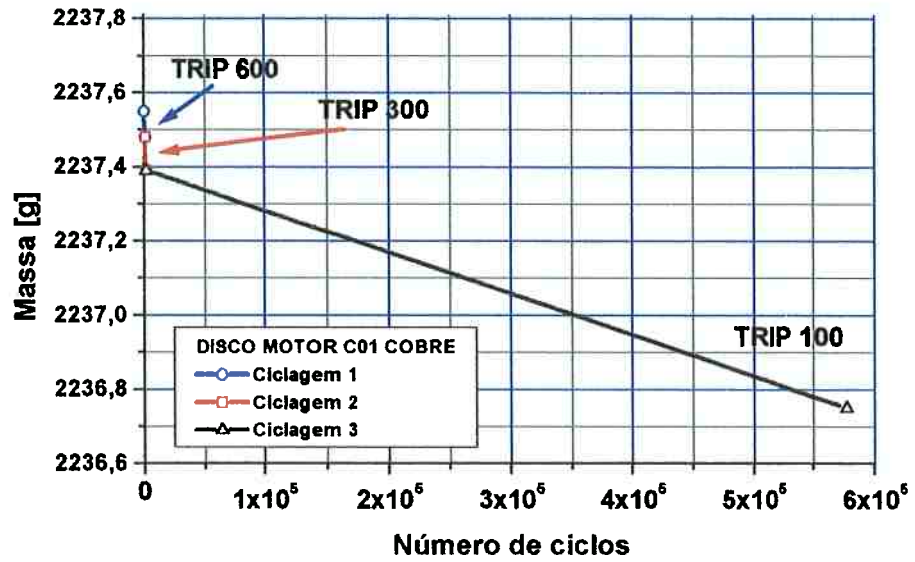


Figura 306. Evolução do Nível de Pressão Sonora e relação de deslizamento durante o par de discos de Cobre C01 (motor) e Aço ER85mrv (movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO COBRE-AÇO



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO COBRE-AÇO

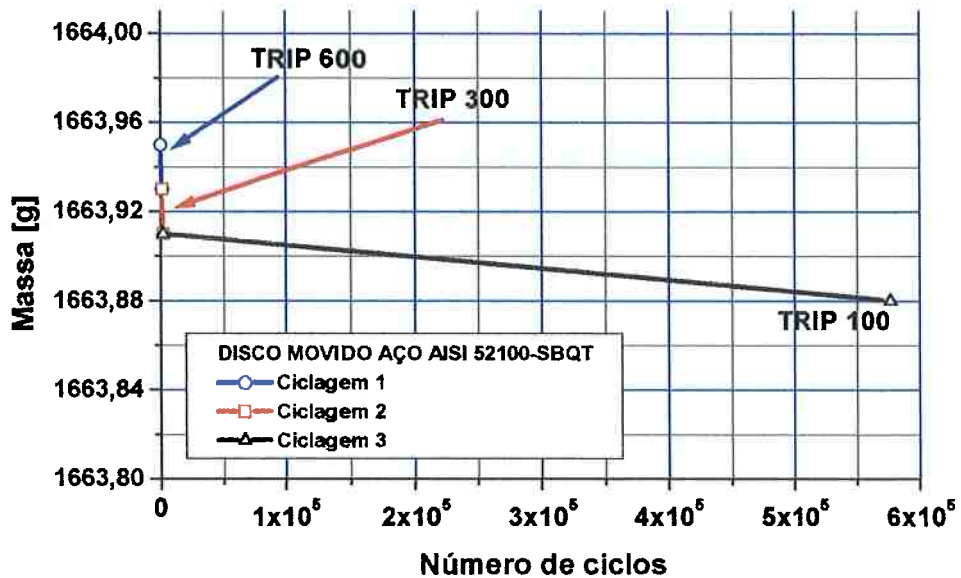
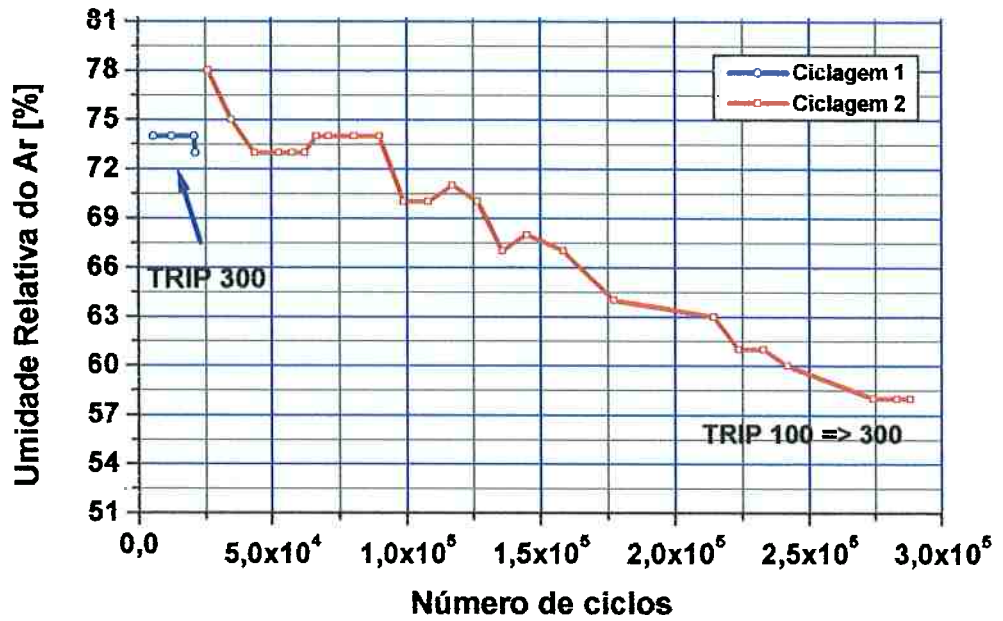


Figura 307. Evolução da perda de massa dos discos motor e movido durante o ensaio do par de discos de Cobre C01 (motor) e Aço ER85mrv (movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO COBRE-AÇO



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO COBRE-AÇO

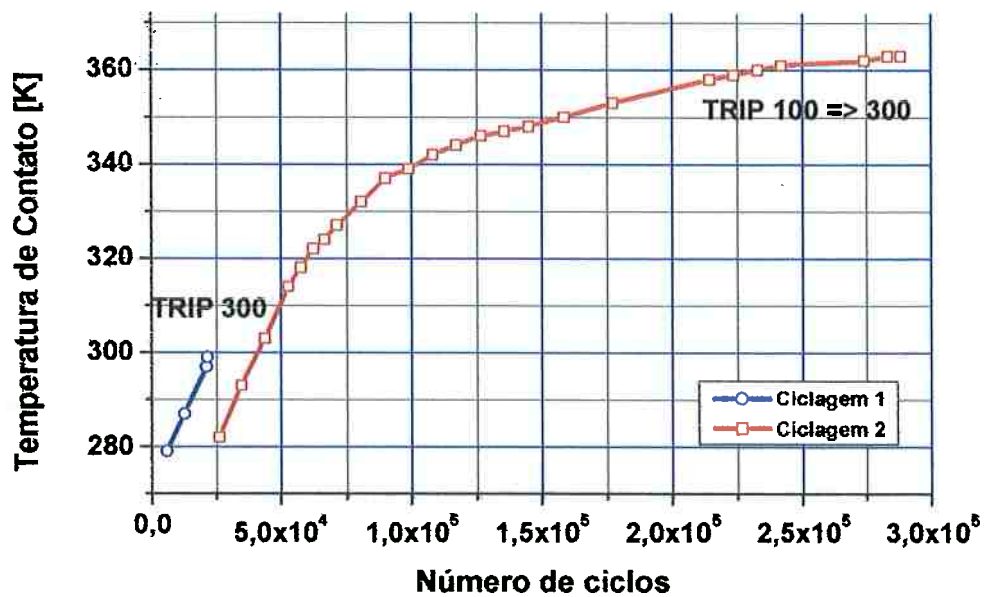
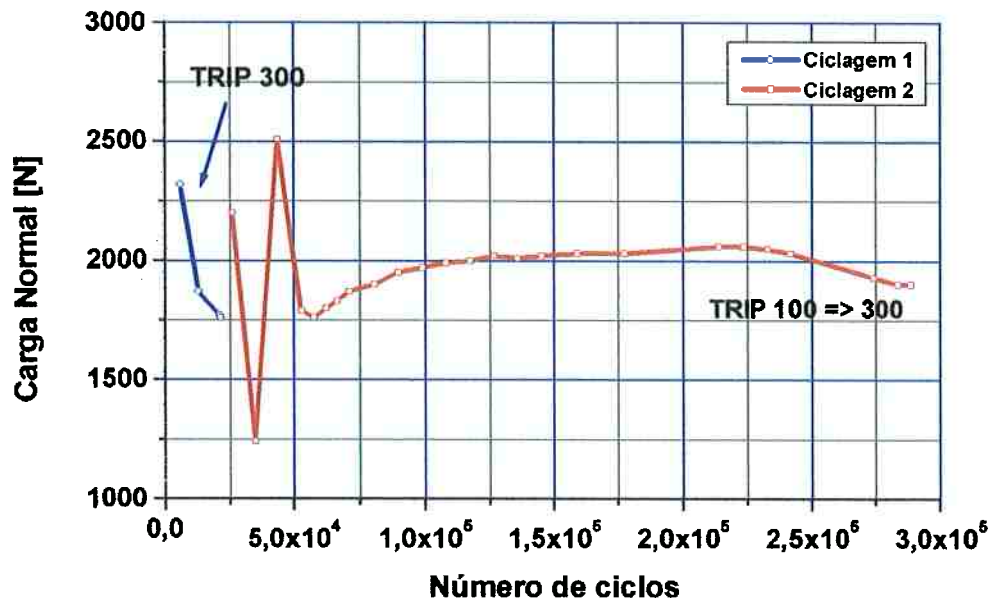


Figura 308. Evolução da umidade da sala e temperatura de contato durante o ensaio do par de discos de Cobre C02 (motor) e Aço ER81mrv (movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO COBRE-AÇO



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO COBRE-AÇO

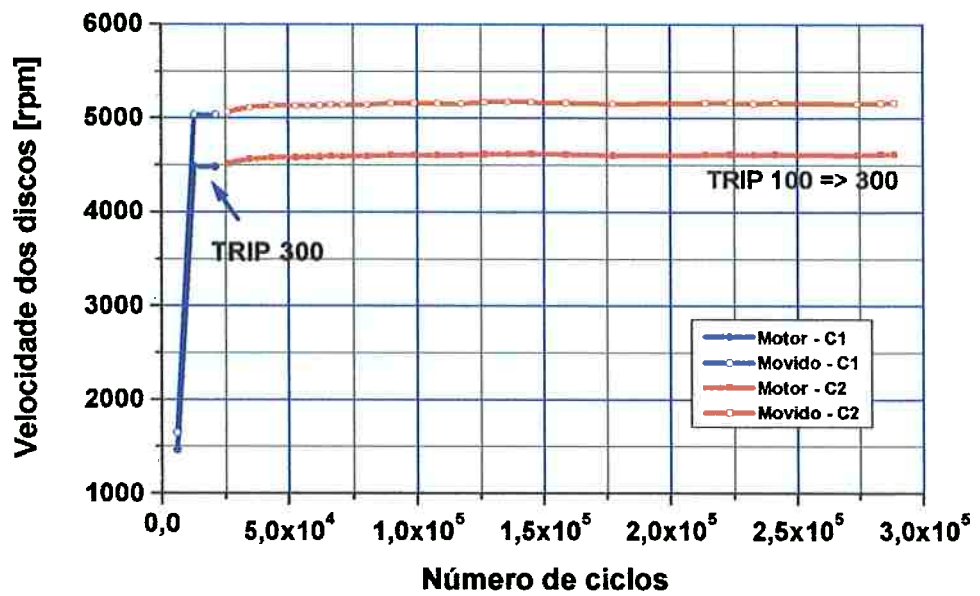
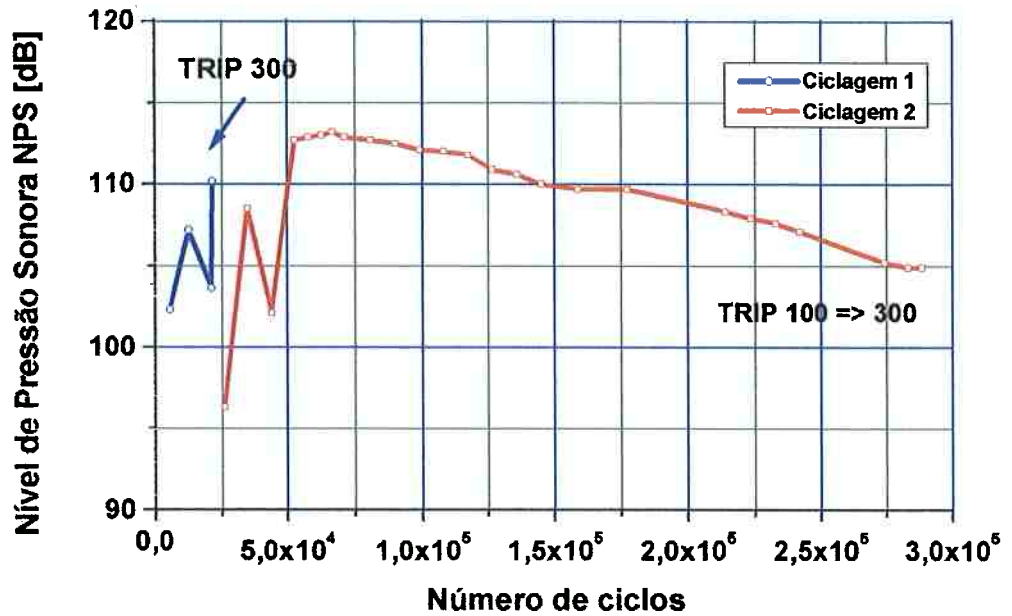


Figura 309. Evolução da carga normal de contato e velocidade durante o ensaio do par de discos de Cobre C02 (motor) e Aço ER81 mrv (movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO COBRE-AÇO



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO COBRE-AÇO

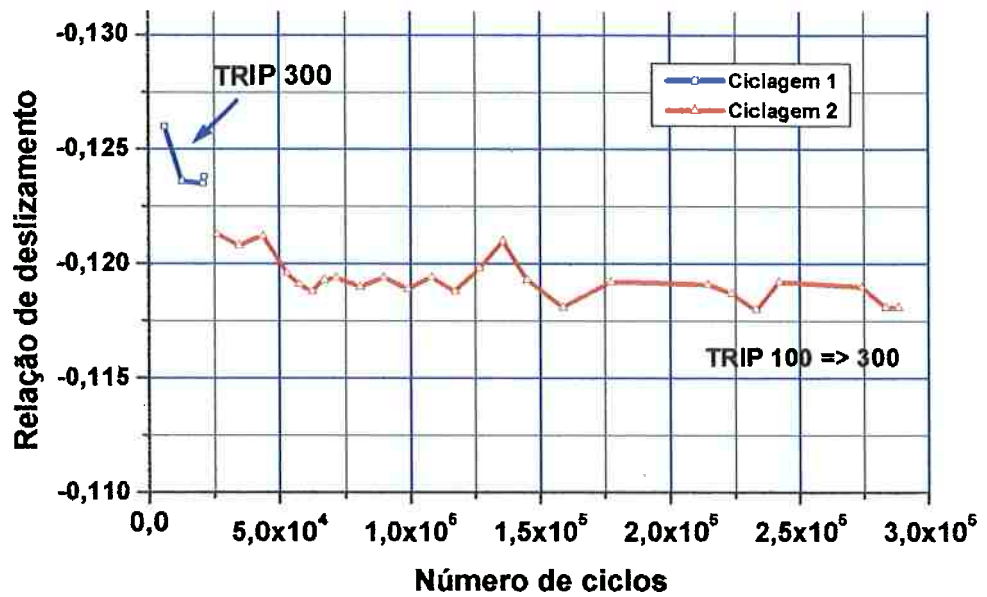
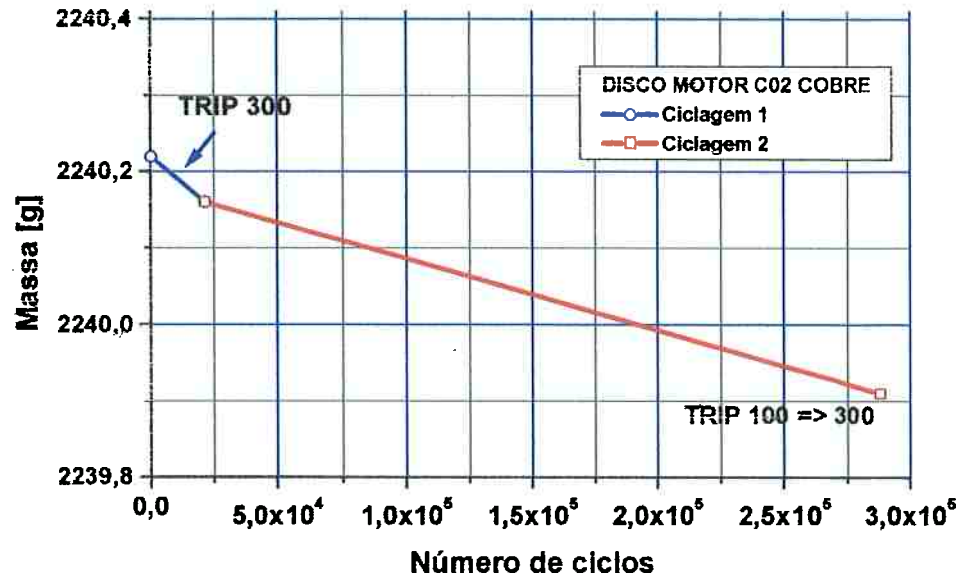


Figura 310. Evolução do Nível de Pressão Sonora e relação de deslizamento durante o par de discos de Cobre C02 (motor) e Aço ER81mrv (movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO COBRE-AÇO



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO COBRE-AÇO

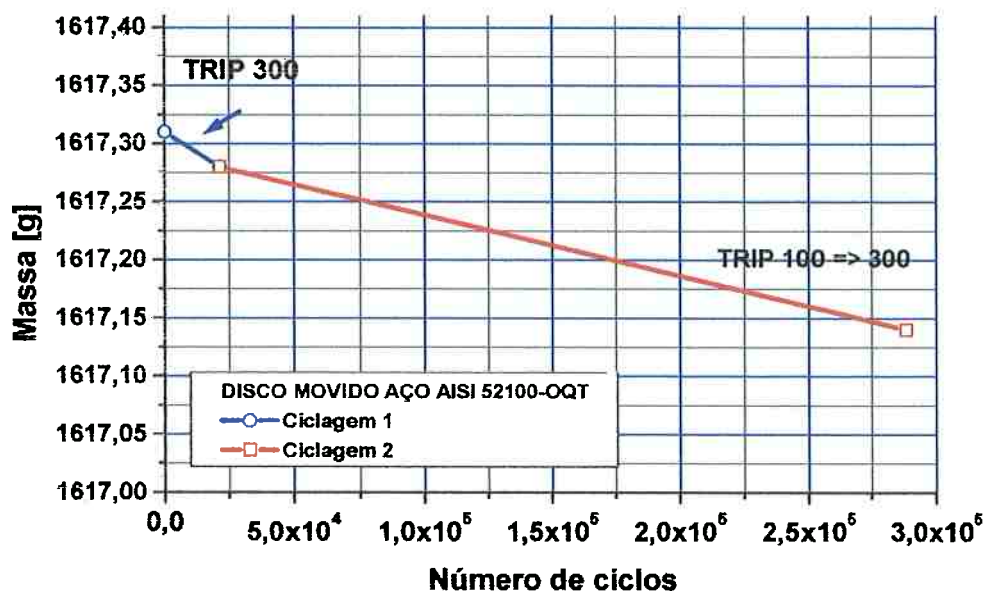
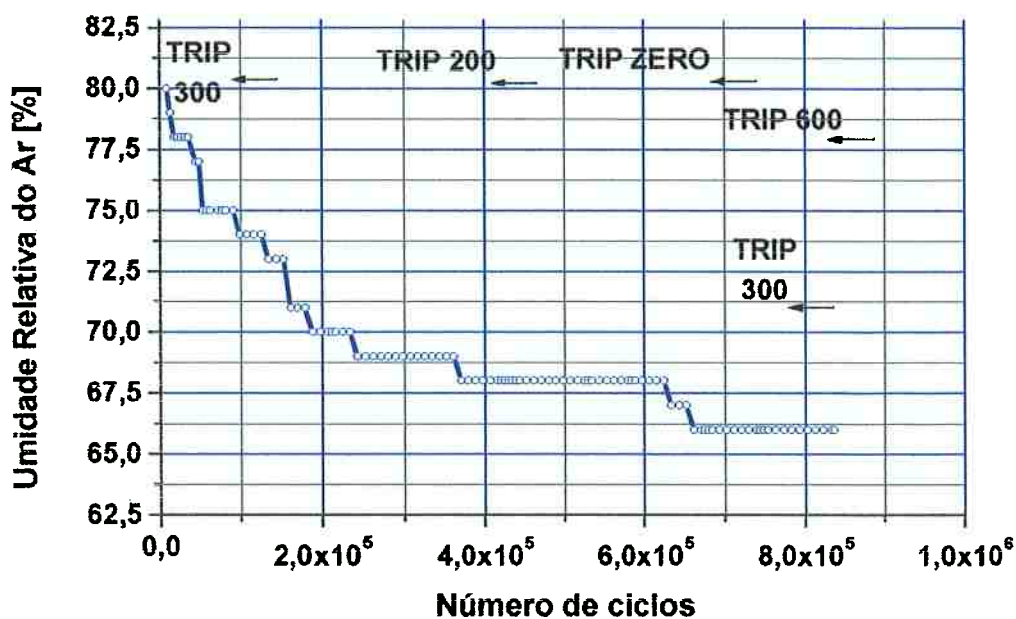


Figura 311. Evolução da perda de massa dos discos motor e movido durante o ensaio do par de discos de Cobre C02 (motor) e Aço ER81mrv (movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO COBRE-AÇO



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO COBRE-AÇO

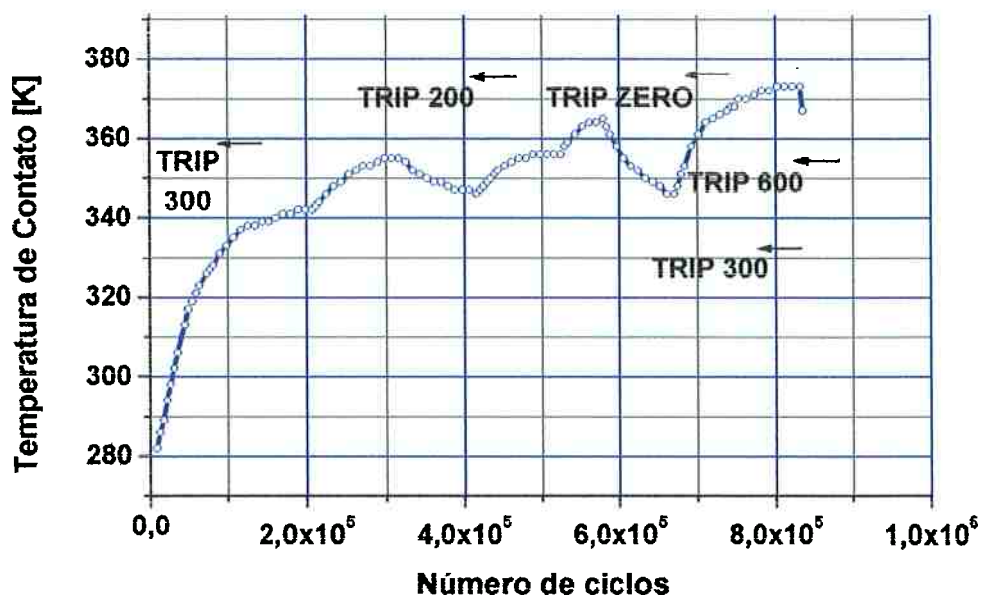
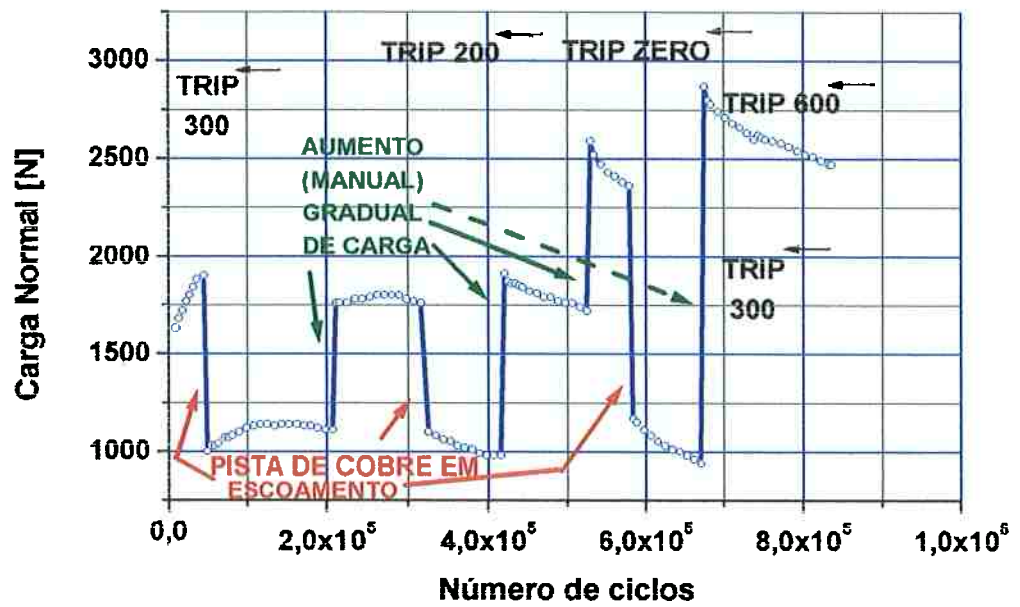


Figura 312. Evolução da umidade da sala e temperatura de contato durante o ensaio do par de discos de Cobre C03 (motor) e Aço ER82mv (movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO COBRE-AÇO



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO COBRE-AÇO

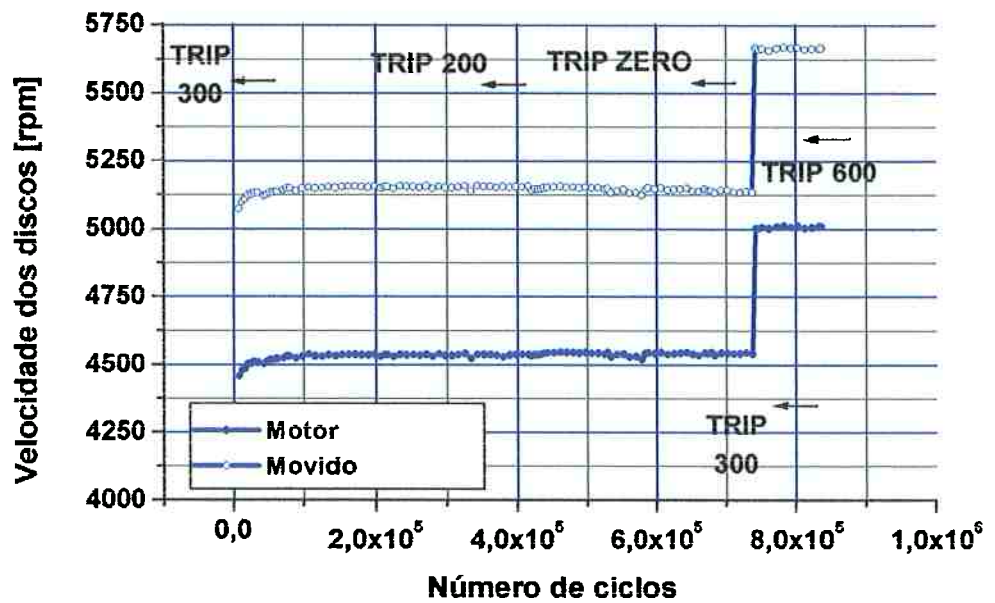
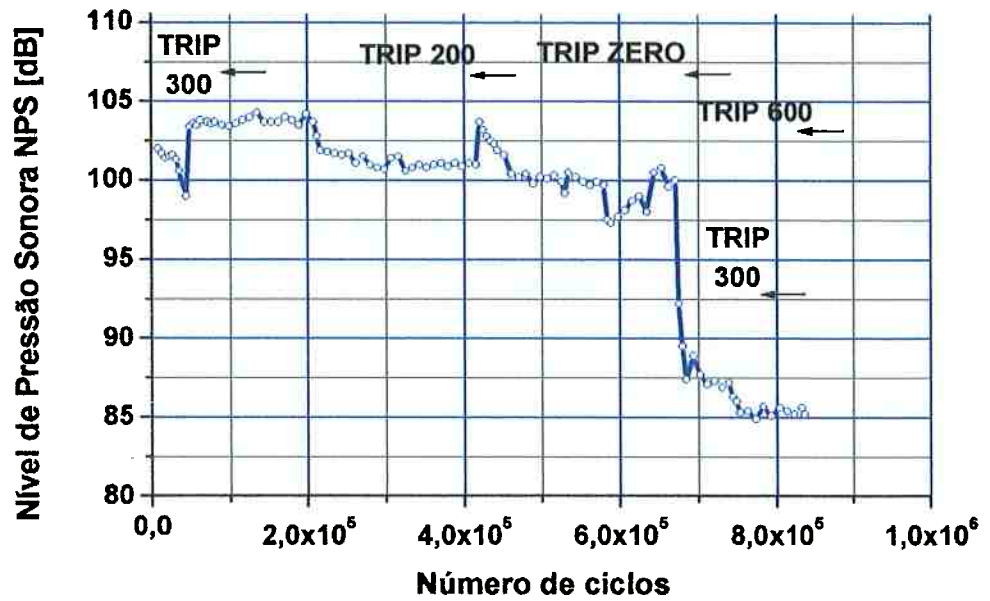


Figura 313. Evolução da carga normal de contato e velocidade durante o ensaio do par de discos de Cobre C03 (motor) e Aço ER82mv (movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO COBRE-AÇO



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO COBRE-AÇO

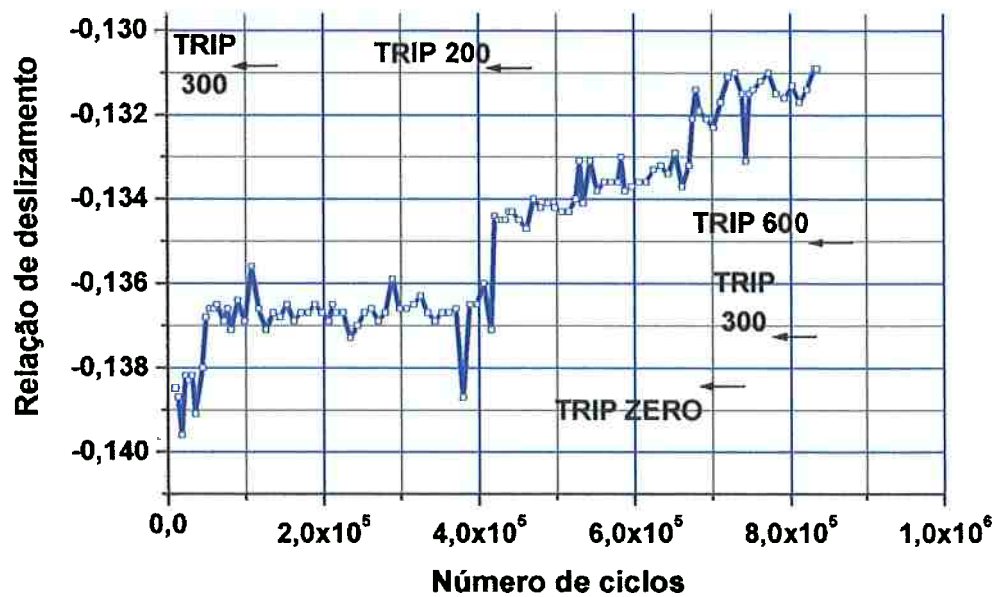
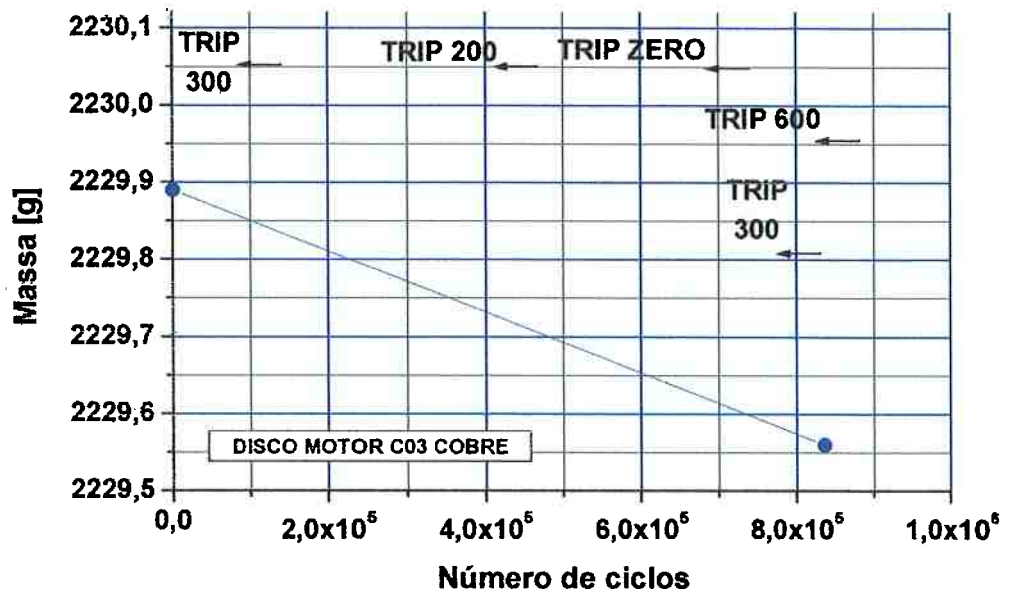


Figura 314. Evolução do Nível de Pressão Sonora e relação de deslizamento durante o par de discos de Cobre C03 (motor) e Aço ER82mv (movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO COBRE-AÇO



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO COBRE-AÇO

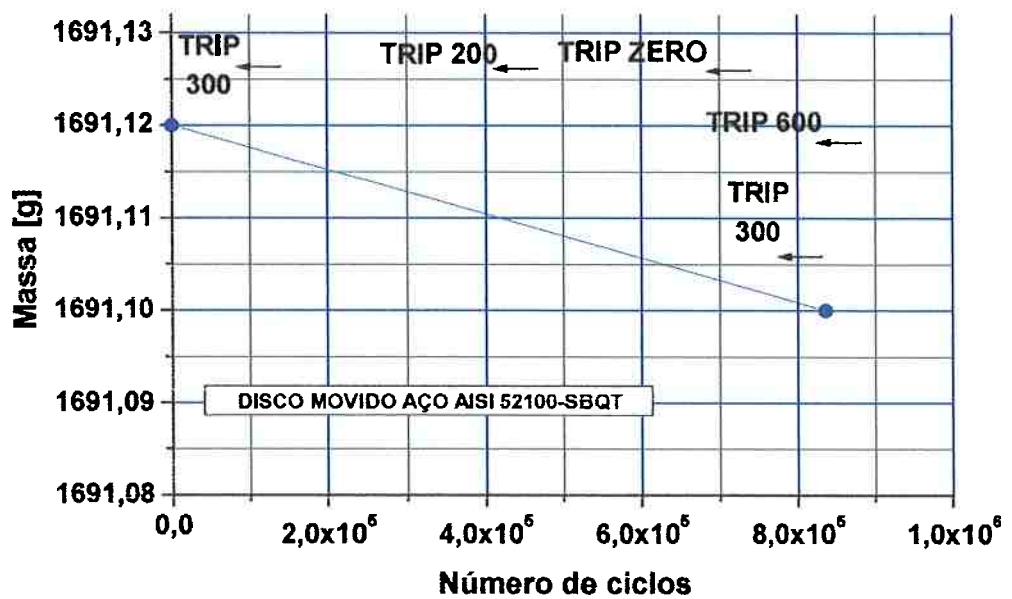


Figura 315. Evolução da perda de massa dos discos motor e movido durante o ensaio do par de discos de Cobre C03 (motor) e Aço ER82mv (movido)

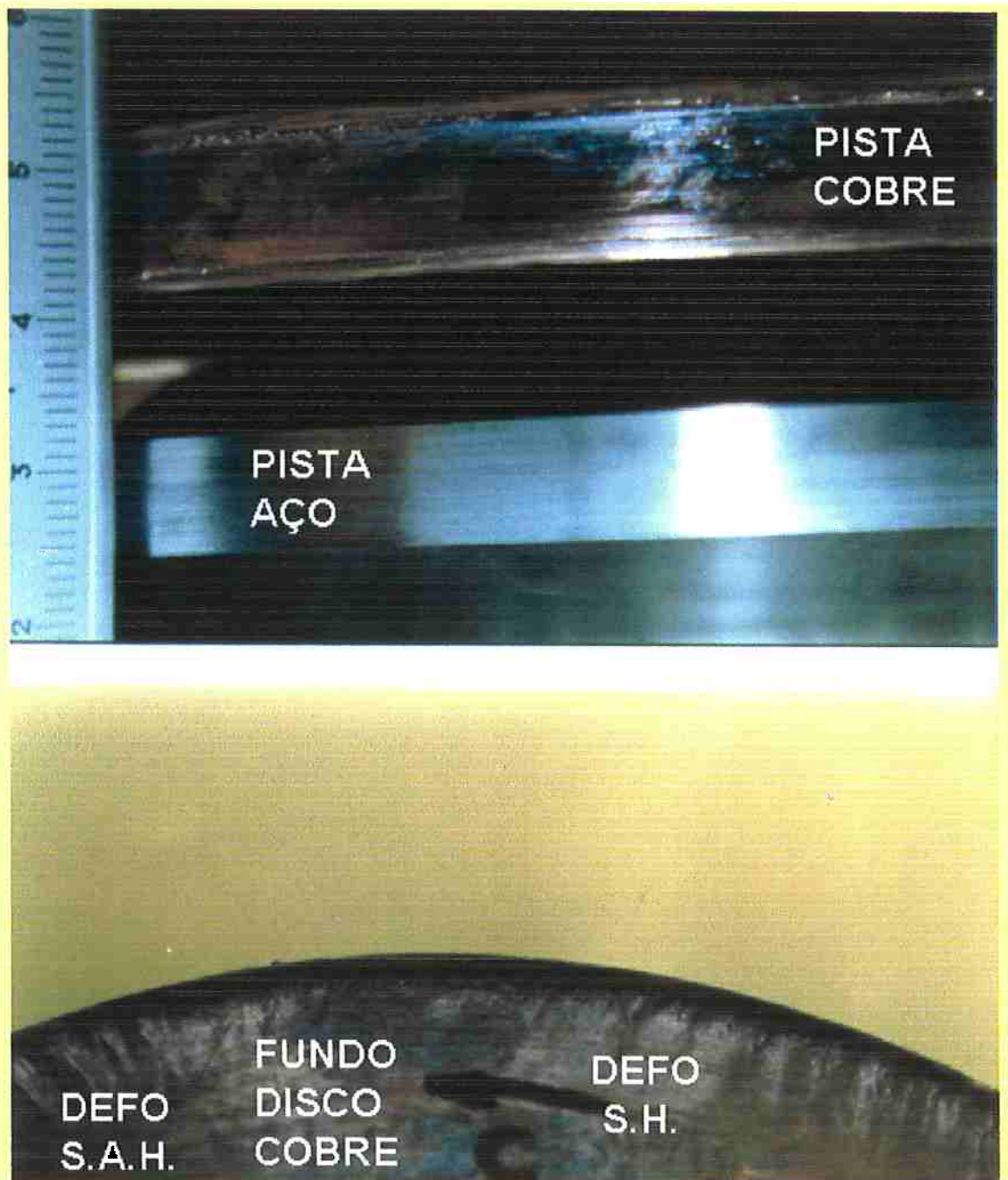
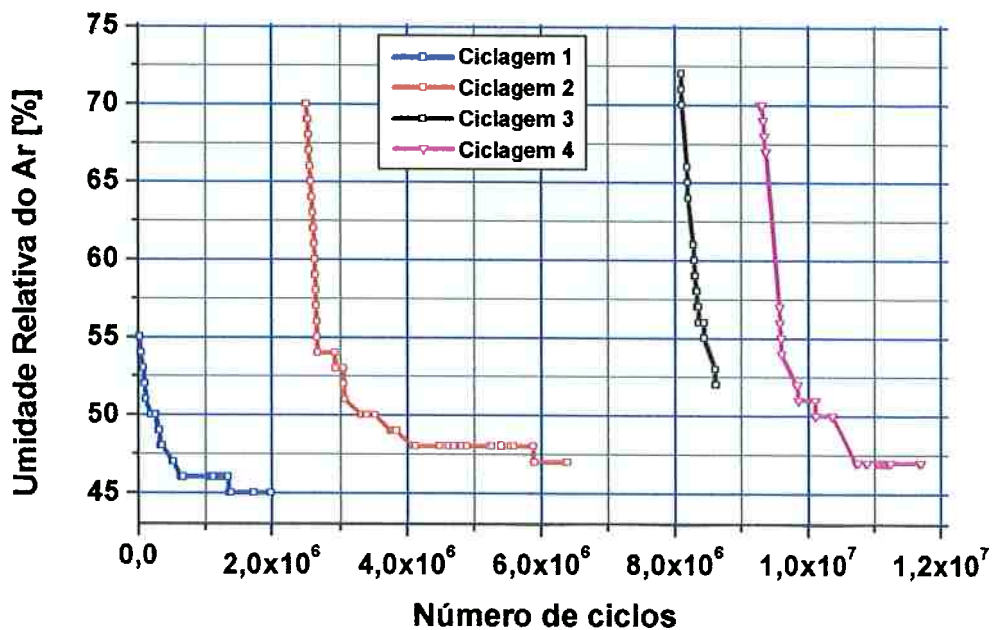


Figura 316. Desgaste dos discos motor e movido após o ensaio de um par de discos de Cobre (motor) e Aço AISI 52100 temperado e revenido (movido): acima pistas; embaixo, deformações nos sentidos horário (S.H.) e anti-horário (S.A.H.) na parte posterior do disco de cobre, cujo sentido de giro é anti-horário.

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO

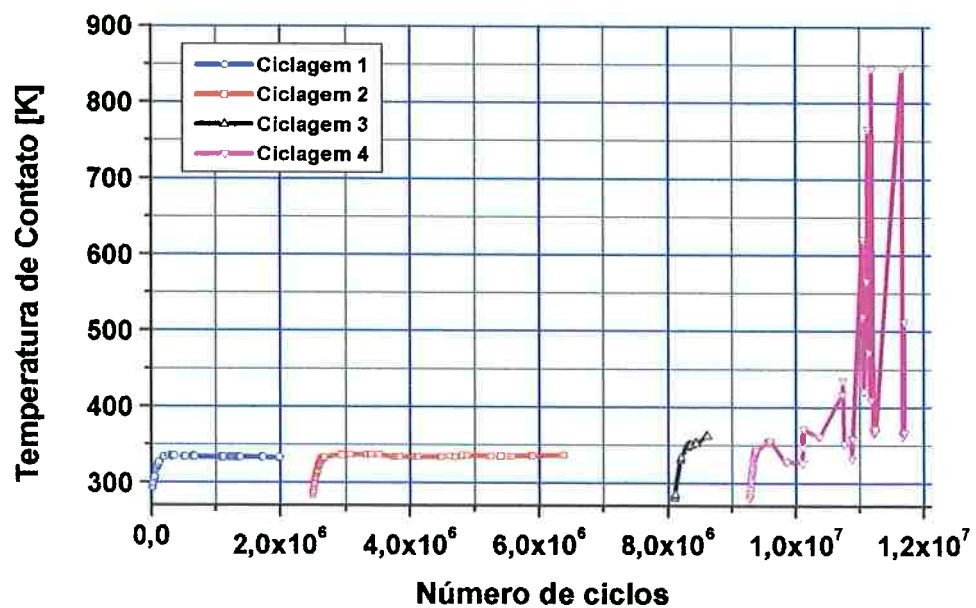
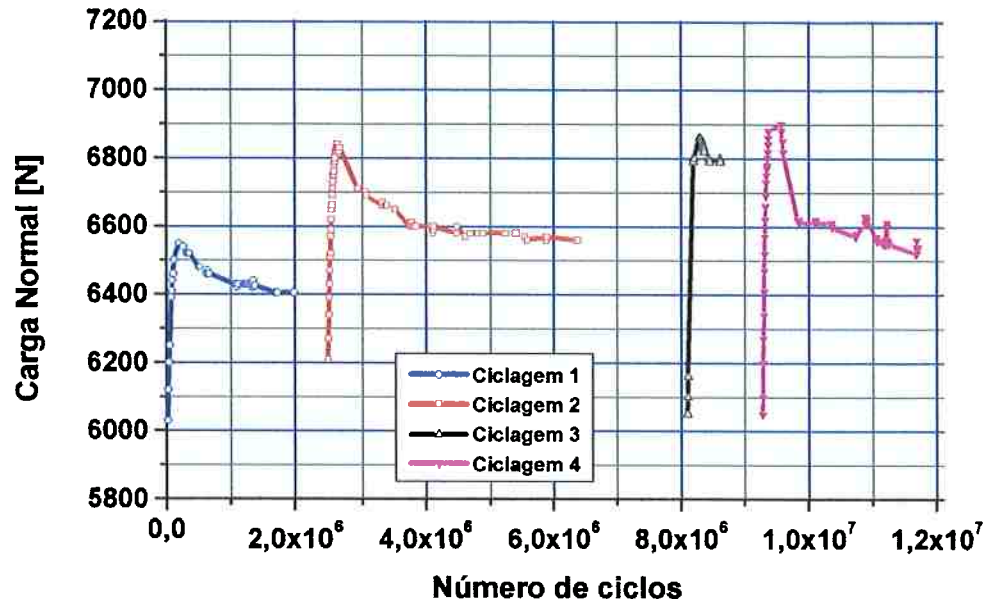


Figura 317. Evolução da umidade da sala e temperatura de contato durante o ensaio ER85 dos discos de Aço AISI 52100 SBQT (motor e movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO

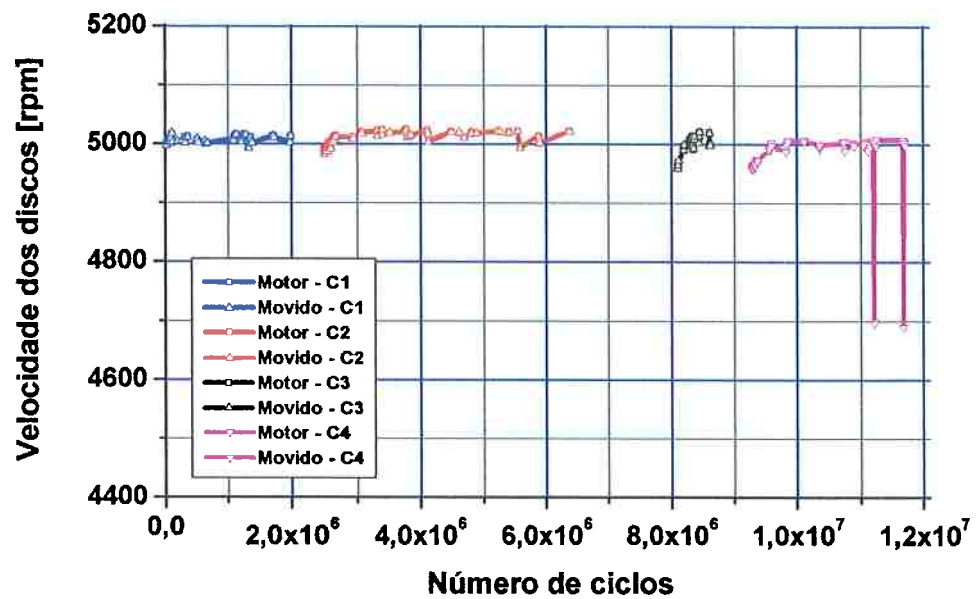
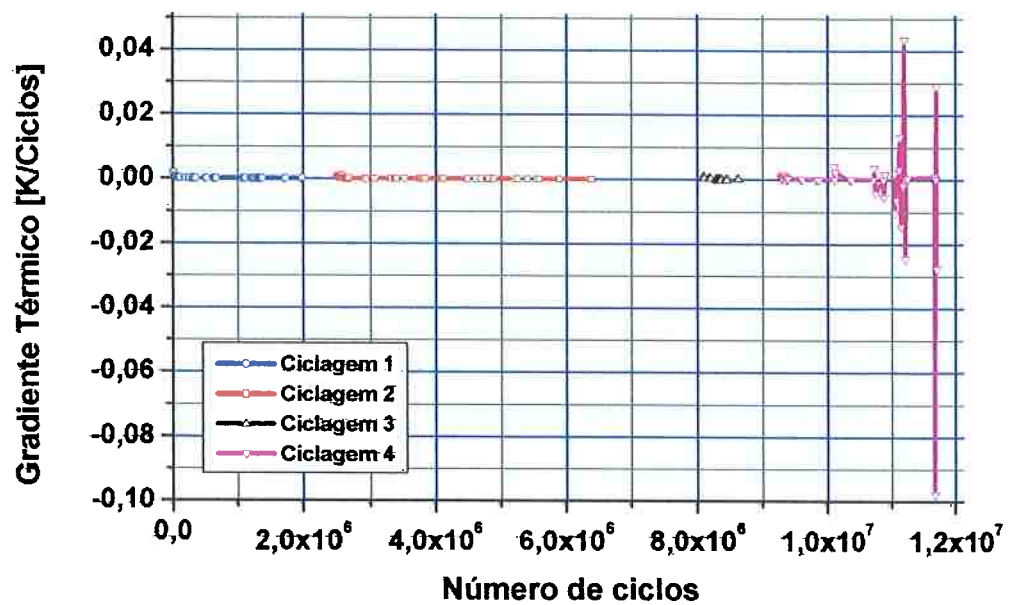


Figura 318. Evolução da carga normal de contato e velocidade durante o ensaio ER85 dos discos de Aço AISI 52100 SBQT (motor e movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO

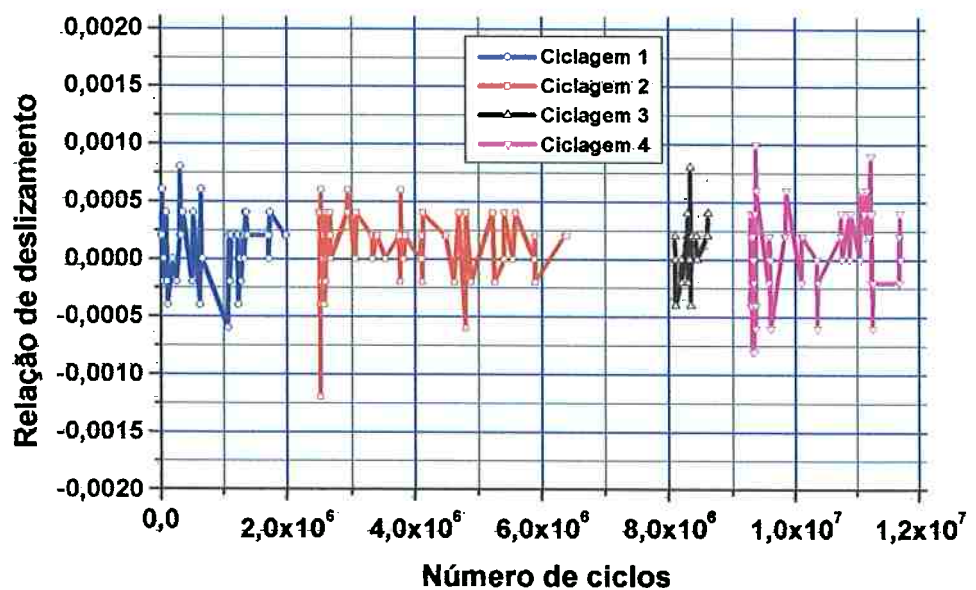
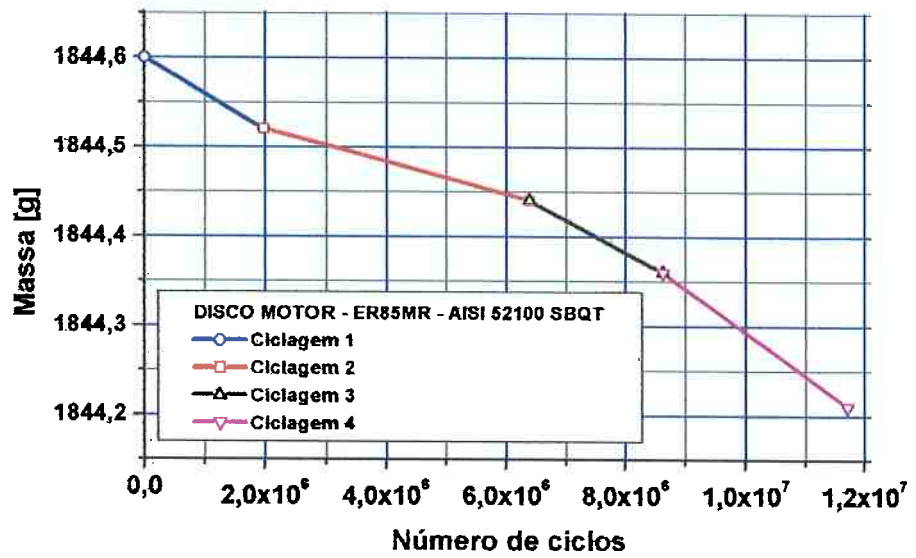


Figura 319. Gradiente de temperatura por ciclo e relação de deslizamento durante o ensaio ER85 dos discos de Aço AISI 52100 SBQT (motor e movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO

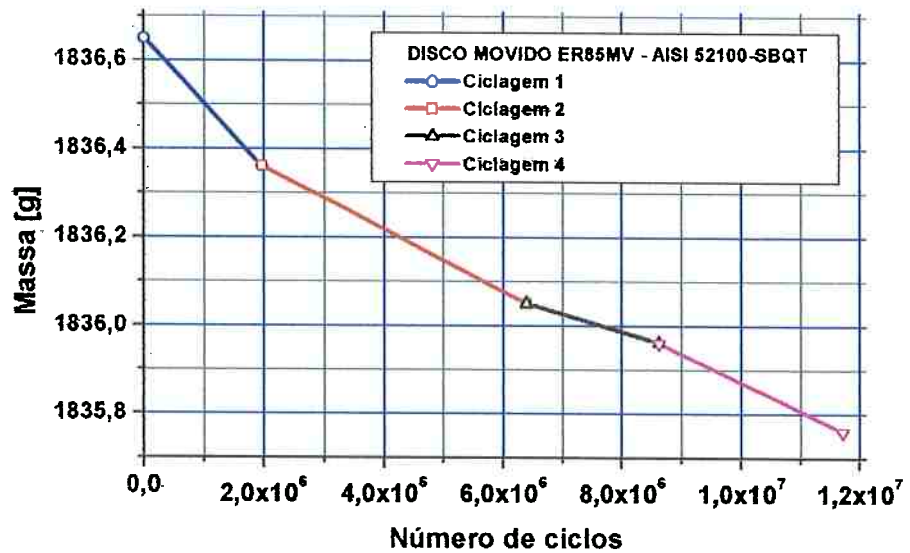
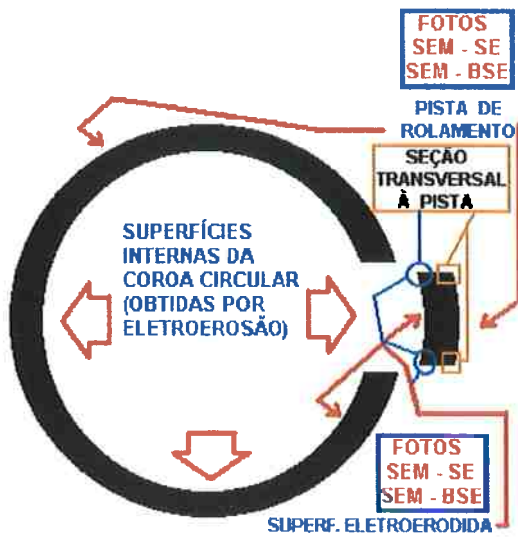


Figura 320. Perda de massa dos discos motor e movido durante o ensaio ER85 dos discos de Aço AISI 52100 SBQT (motor e movido)



10 μm

Figura 321. MICROTRINCA

SEÇÃO CIRCUNFERENCIAL DA PISTA
(Quadrado laranja no esquema acima)

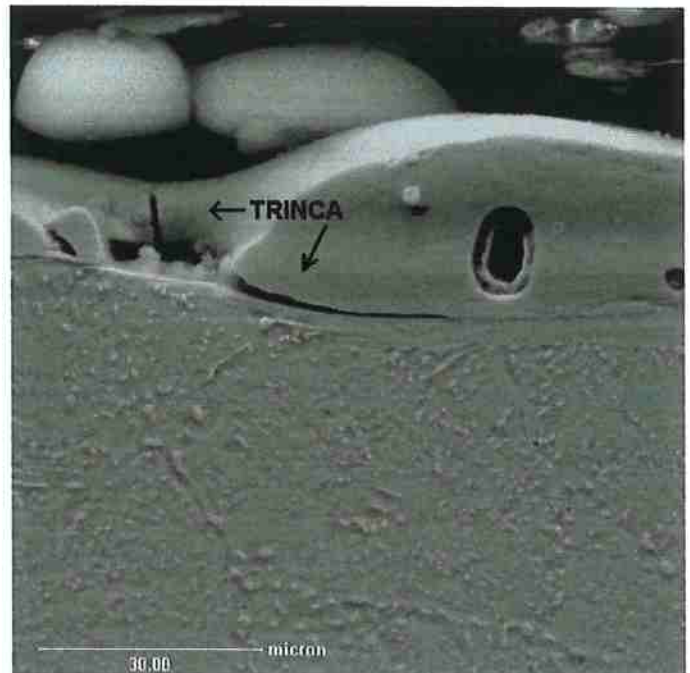
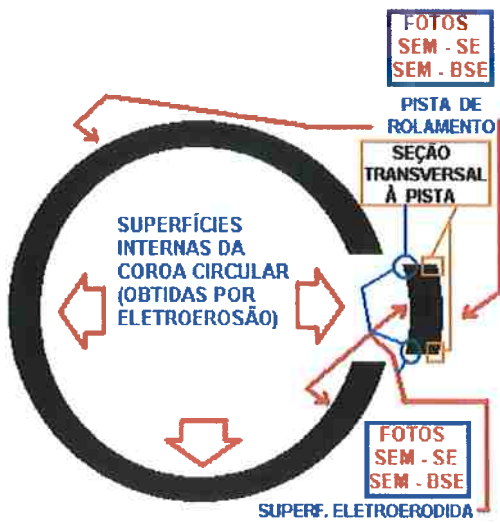


BORDA . PISTA

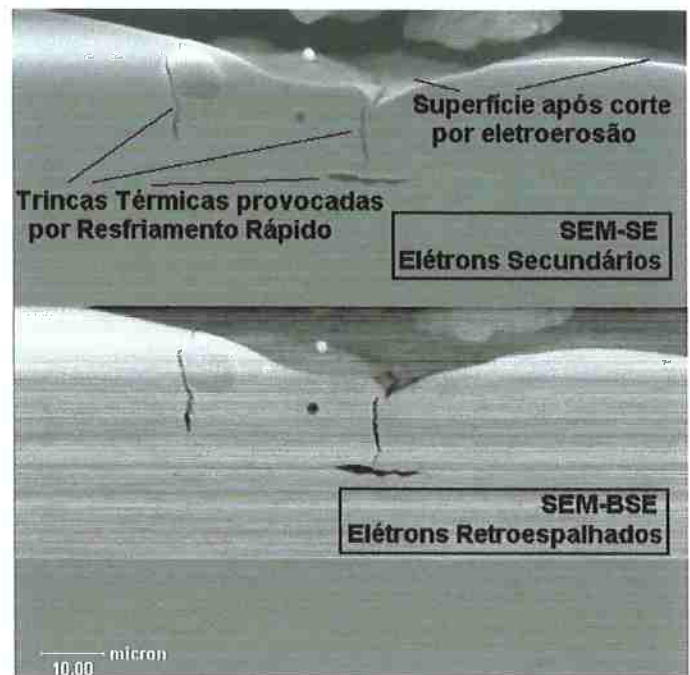
INTERFACE BORDA / PISTA
(Quadrado laranja no esquema acima)

**“ MICROSCUFFING ”
POR ARRASTE DE PARTÍCULA**

Figura 322. Evolução de dano termomecânico por arraste de partícula no contato de rolamento no ensaio ER85, disco motor de Aço 52100 SBQT, 11,6 Megaciclos

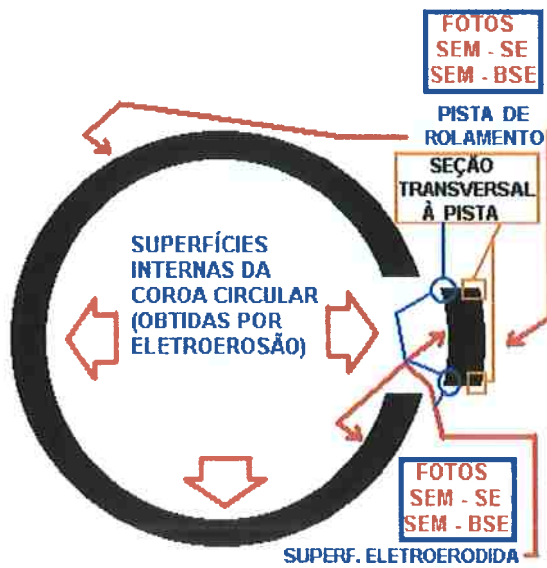


Seção transversal à pista, círculo azul 30 μm “MICROTRINCA TÉRMICA”

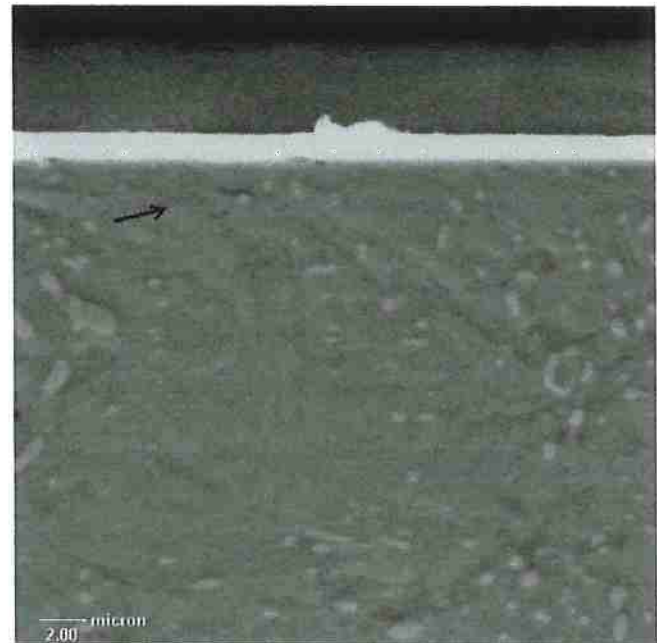


Seção transversal à pista, círculo azul 20 μm “MICROTRINCA TÉRMICA”

Figura 323. Trincas devido às altas tensões térmicas de tração nas direções *radial* (verticais, nas fotos) e *circunferencial* (horizontais) por *resfriamento rápido* após-eletroerosão, subsequente à fusão local na borda da seção transversal interna da coroa circular, após o ensaio ER85, disco movido



5µm Figura 324. "MICROSPALLING"



5µm "MICROTRINCA" (PARALELA À PISTA)

(Quadrado laranja no esquema acima)

Figura 325. Trinca micrométrica subsuperficial por fadiga de contato
(Ensaio ER85, disco movido de Aço AISI 52100 SBQT, após 11,6 Megaciclos, 2,33 GPa, 848 K)

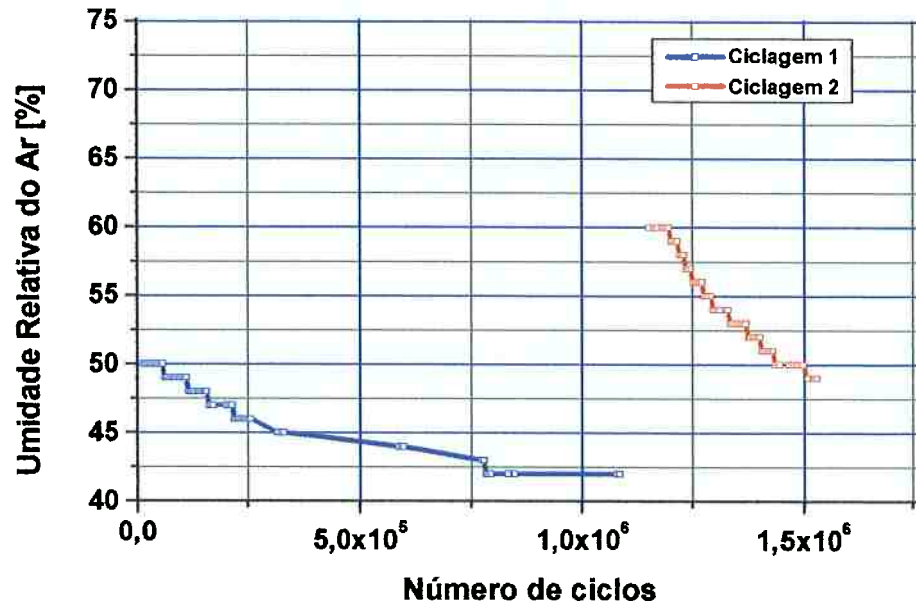
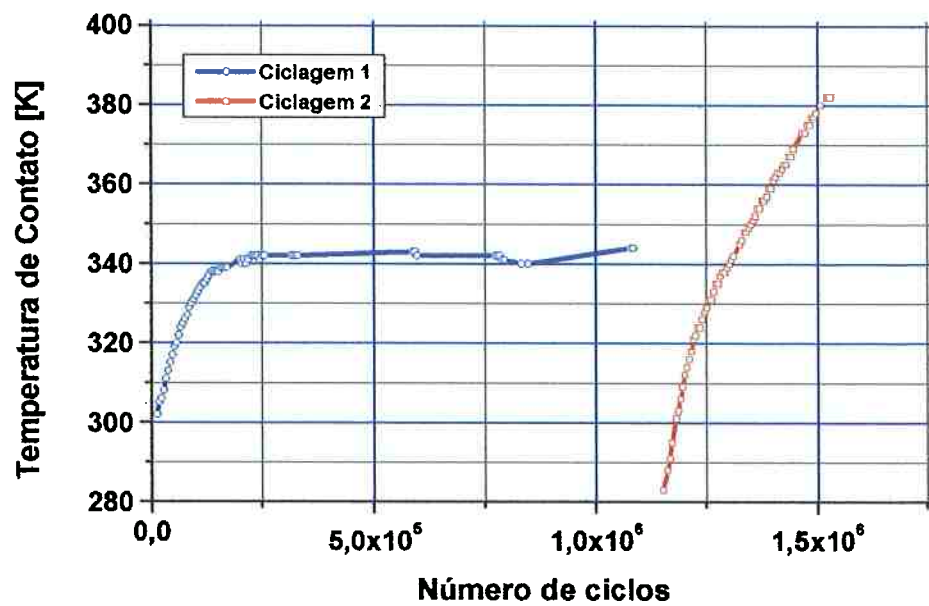
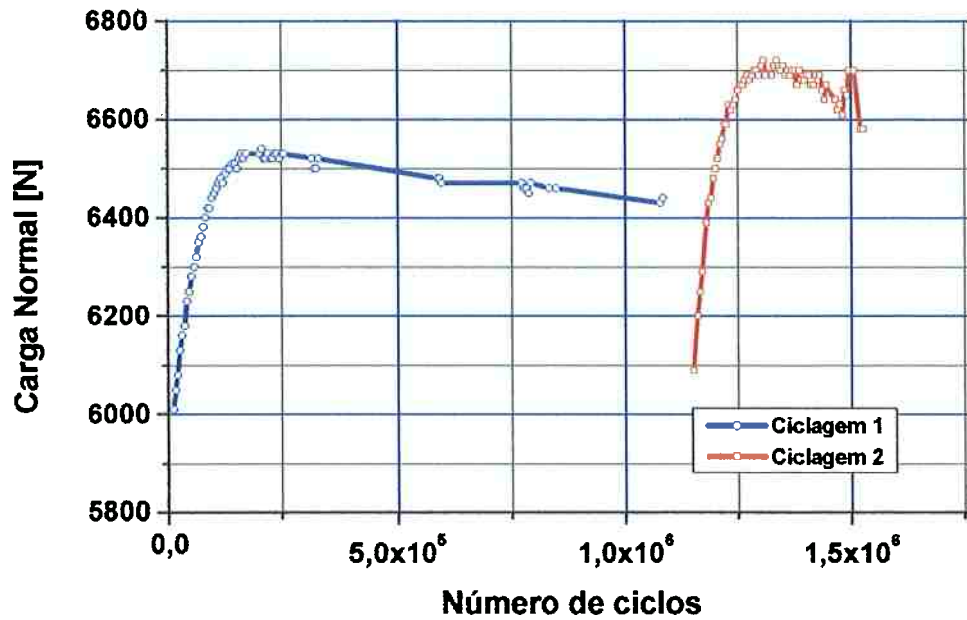
ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO**ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO**

Figura 326. Evolução da umidade da sala e temperatura de contato durante o ensaio ER84 dos discos de Aço AISI 52100 SBQT (motor) e AISI 52100 OQT (movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO

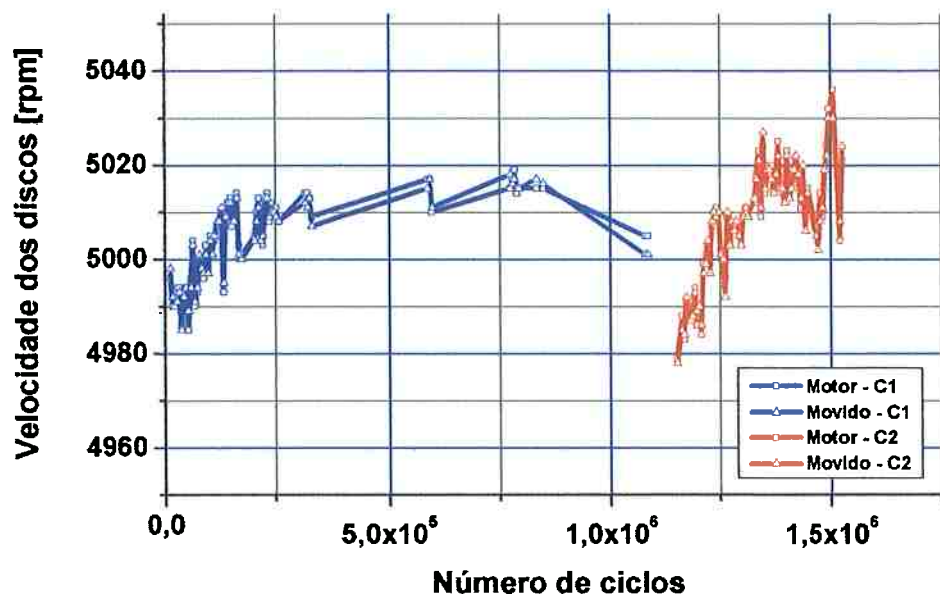
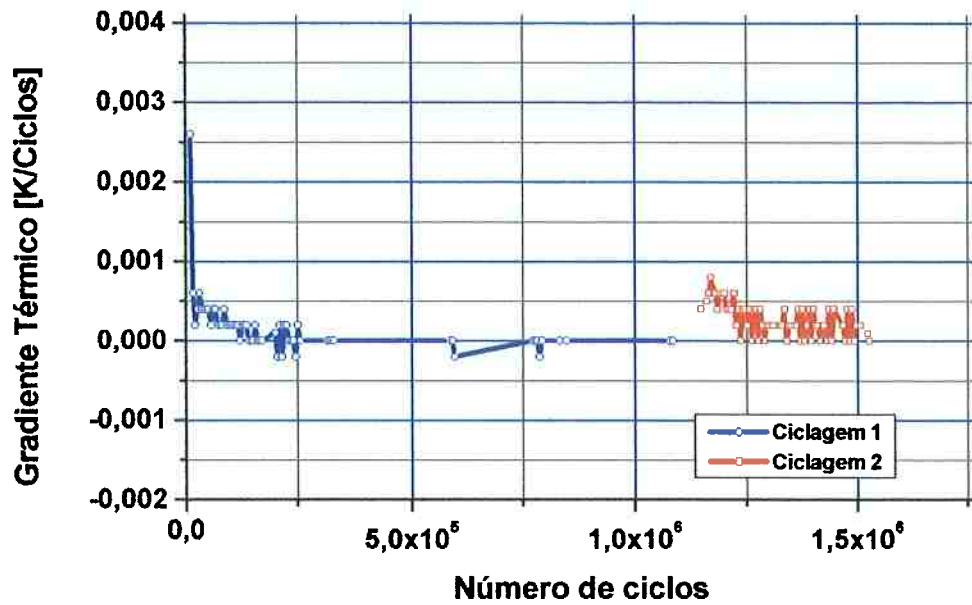


Figura 327. Evolução da carga normal de contato e velocidade durante o ensaio ER84 dos discos de Aço AISI 52100 SBQT (motor) e AISI 52100 OQT (movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO

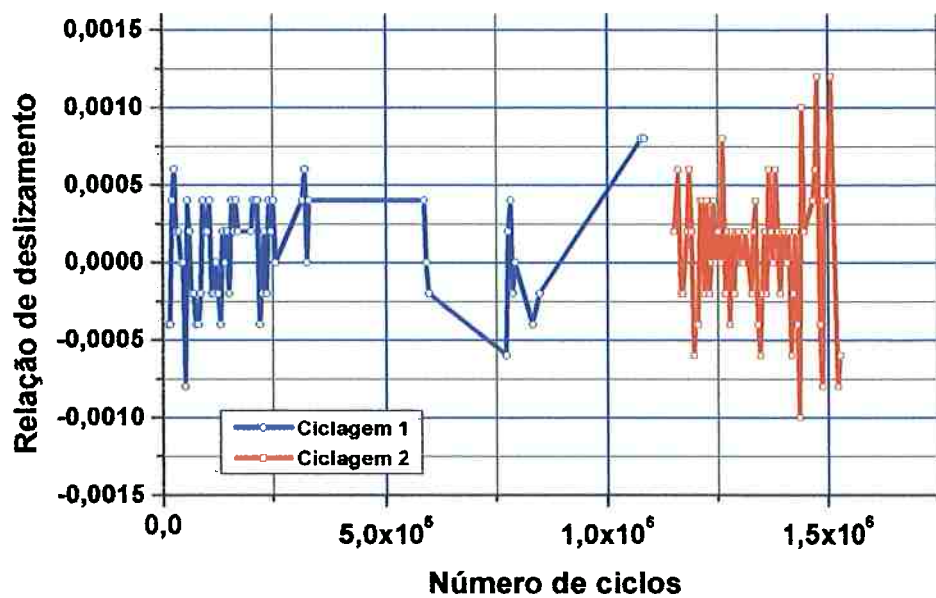
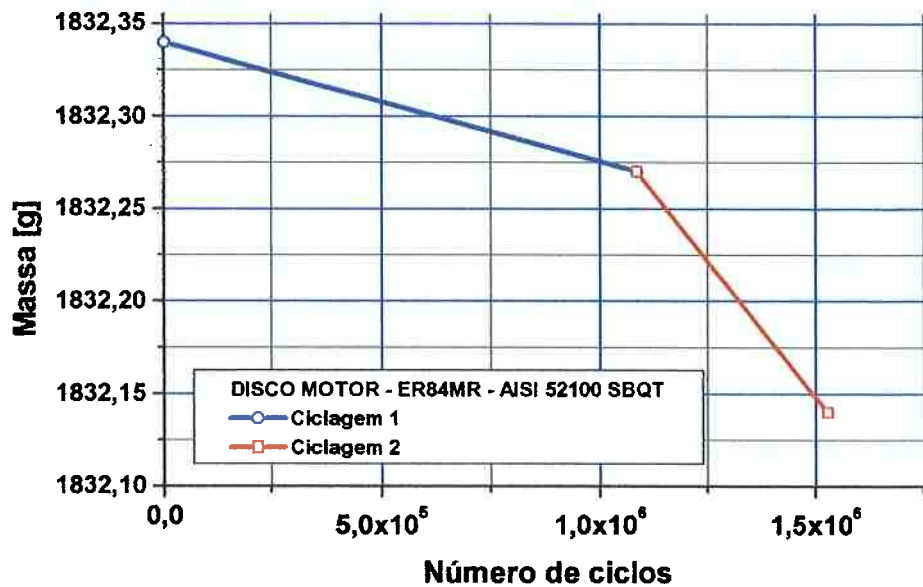


Figura 328. Gradiente de temperatura por ciclo e relação de deslizamento durante o ensaio ER84 dos discos de Aço AISI 52100 SBQT (motor) e AISI 52100 OQT (movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO

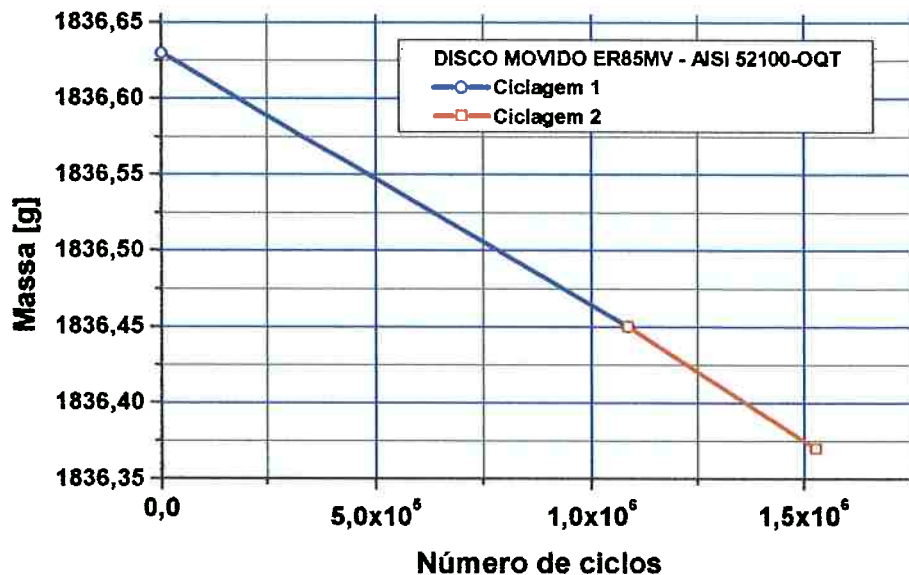


Figura 329. Evolução da perda de massa dos discos motor e movido durante o ensaio ER84 dos discos de Aço AISI 52100 SBQT (motor) e AISI 52100 OQT (movido)



Figura 330. Estado das pistas de contato durante o ensaio ER84 dos discos de Aço AISI 52100 SBQT (motor) e AISI 52100 OQT (movido), após 1,14 Megaciclos, verificando-se que as trilhas já desenvolveram o mecanismo de *corrugação* ou *poligonização*, constatado pela presença intercalada de filmes de óxido mais escuros e mais claros

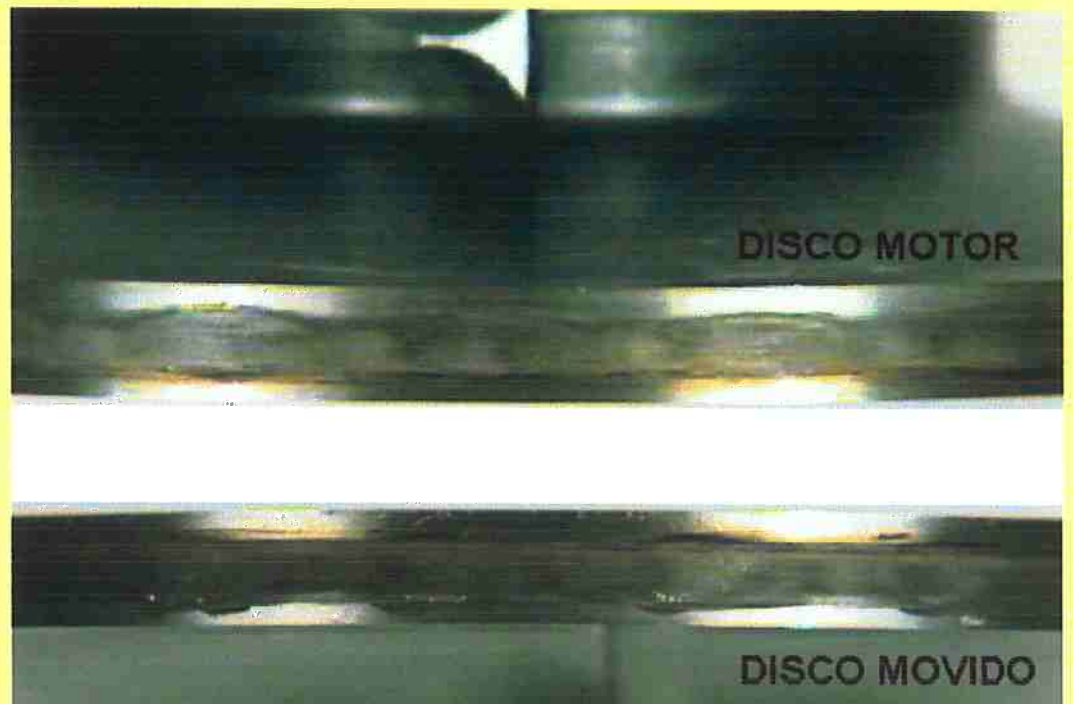
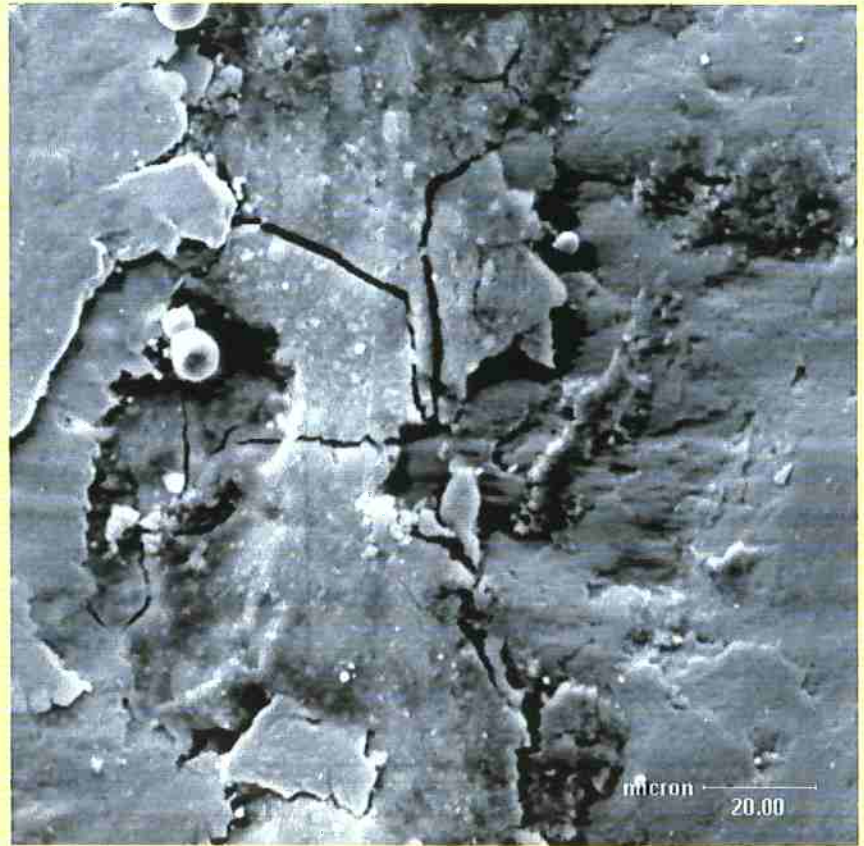


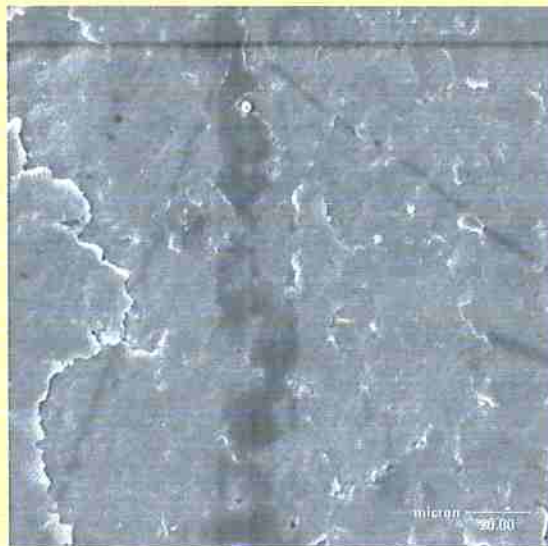
Figura 331. Estado das pistas de contato durante o ensaio ER84 dos discos de Aço AISI 52100 SBQT (motor) e AISI 52100 OQT (movido), após 1,53 Megaciclos,



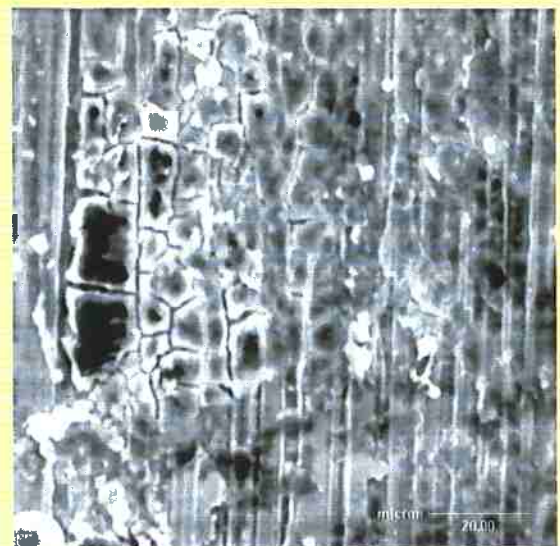
20 μm.

“SPALLING” NO MEIO DA PISTA

Figura 332. “Spalling” na pista, após 1,53 Megaciclos, ensaio ER84



50 μm



20 μm

MEIO DA PISTA

Figura 333. Evidências de danos possivelmente devido à expulsão por rolamento de “debris” durante o ensaio ER84, após 1,53 Megaciclos, e malhas de trincas térmicas na borda da pista de rolamento do disco motor



10 μm

MEIO DA PISTA

Figura 334. Microtrincas circunferenciais (direção vertical) e axiais (direção horizontal), na pista do disco motor ER84, insinuando movimento axial relativo entre os discos motor e movido –“fretting”



50 μm

MEIO DA PISTA

Figura 335. Evolução de danos devido ao contato de rolamento durante o ensaio ER84 do disco motor de Aço AISI 52100 SBQT, após 1,53 Megaciclos

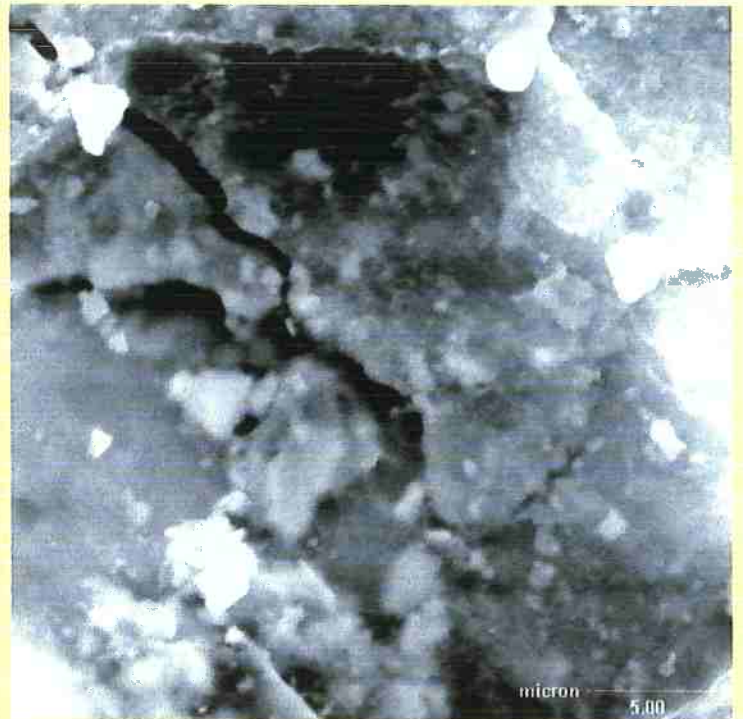


Figura 336. Microtrincas em pista do disco movido, ensaio ER84



20 μm.

**FADIGA TÉRMICA e
DELAMINAÇÃO EM CURSO**

Figura 337. Evolução de danos devido ao contato de rolamento durante o ensaio ER84 do disco movido de Aço AISI 52100 OQT, após 1,53 Megaciclos

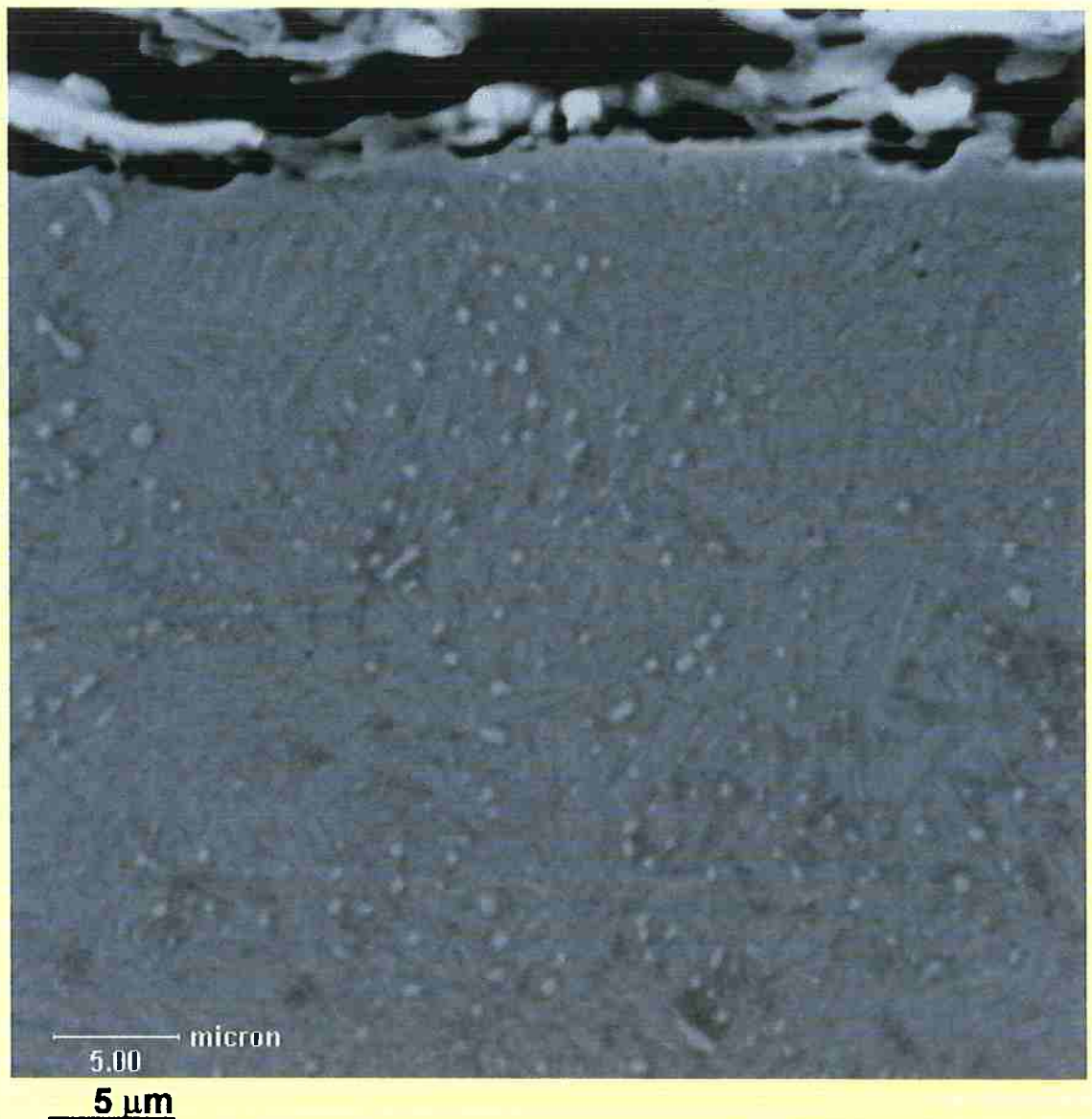
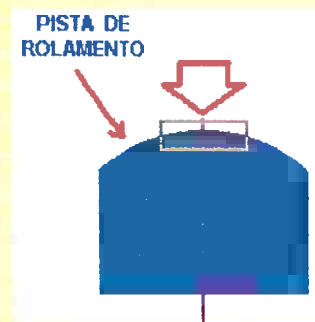


Figura 338. Seção transversal da coroa circular salientando o desgaste severo da pista de rolamento (parte superior da foto) após o ensaio ER84 do disco movido de Aço AISI 52100 OQT, aos 1,53 Megaciclos



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO

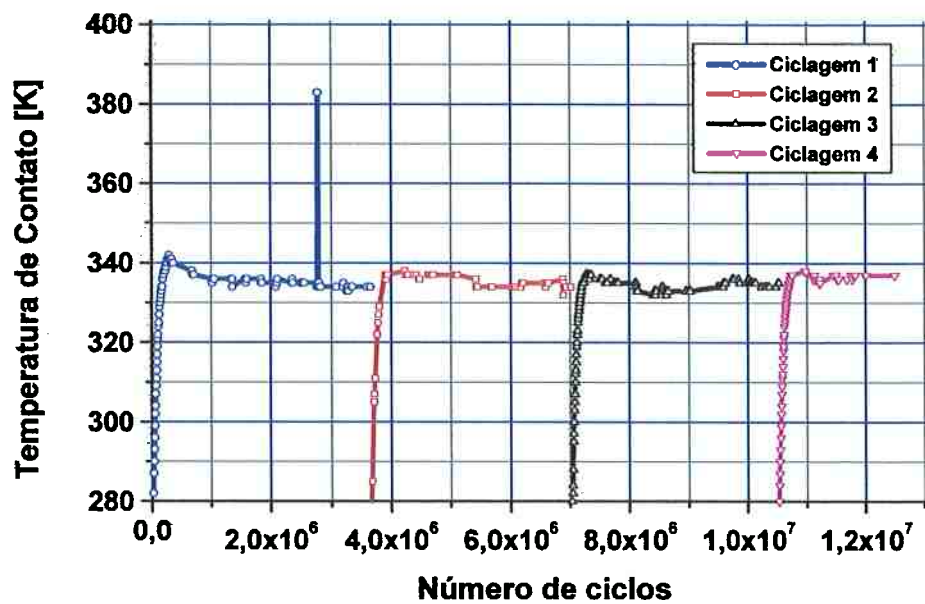
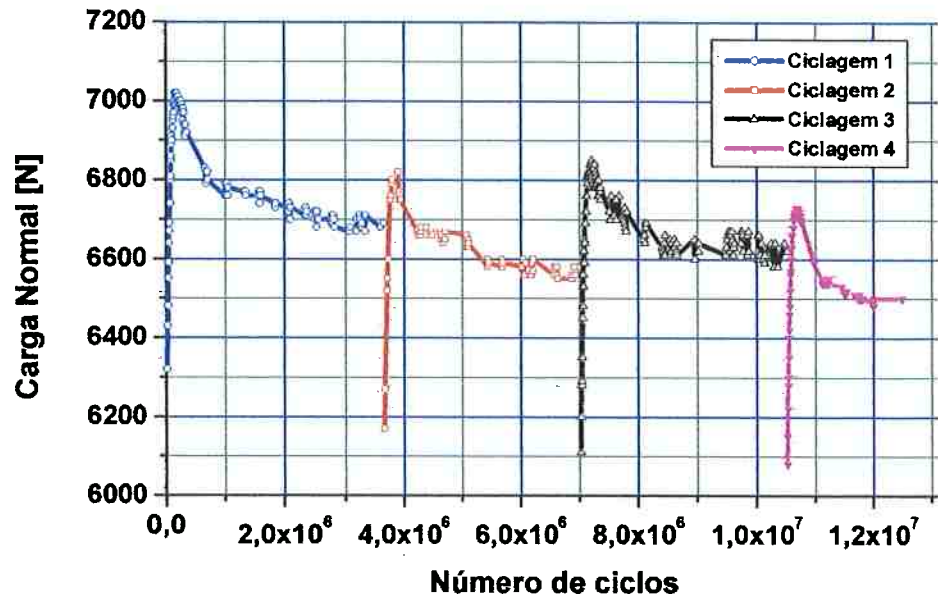


Figura 339. Evolução da umidade da sala e temperatura de contato durante o ensaio ER83 dos discos de Aço AISI 52100 OQT (motor e movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO

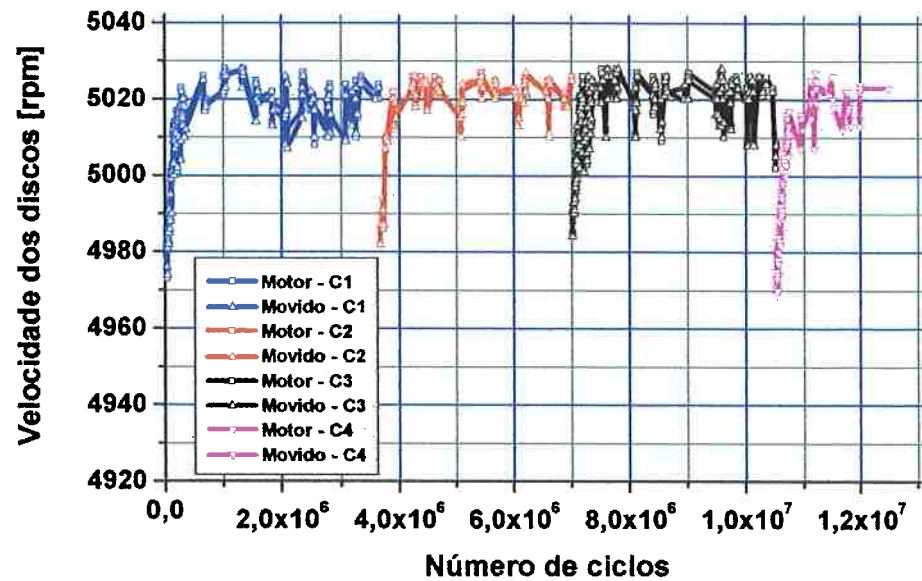
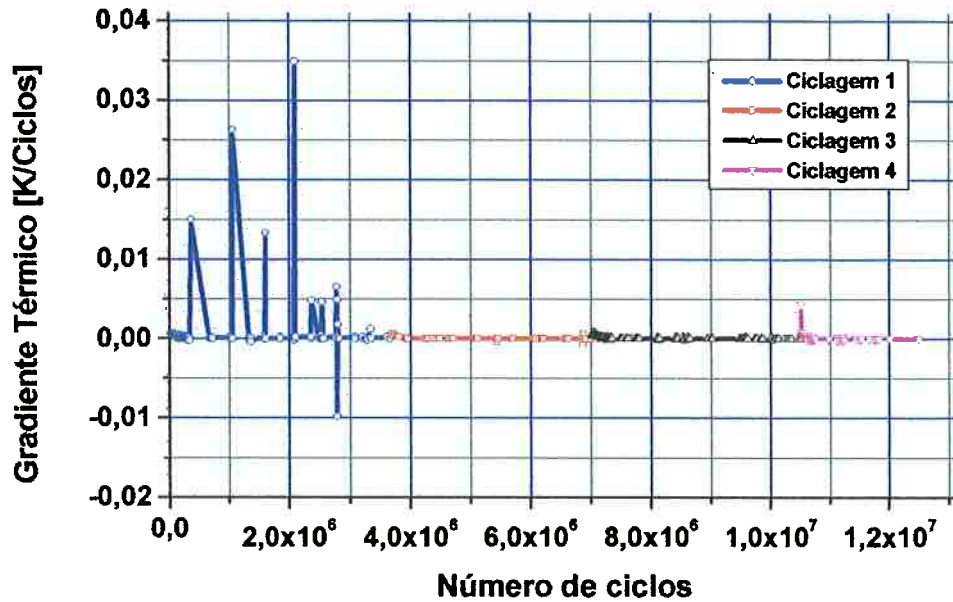


Figura 340. Evolução da carga normal de contato e velocidade durante o ensaio ER83 dos discos de Aço AISI 52100 OQT (motor e movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO

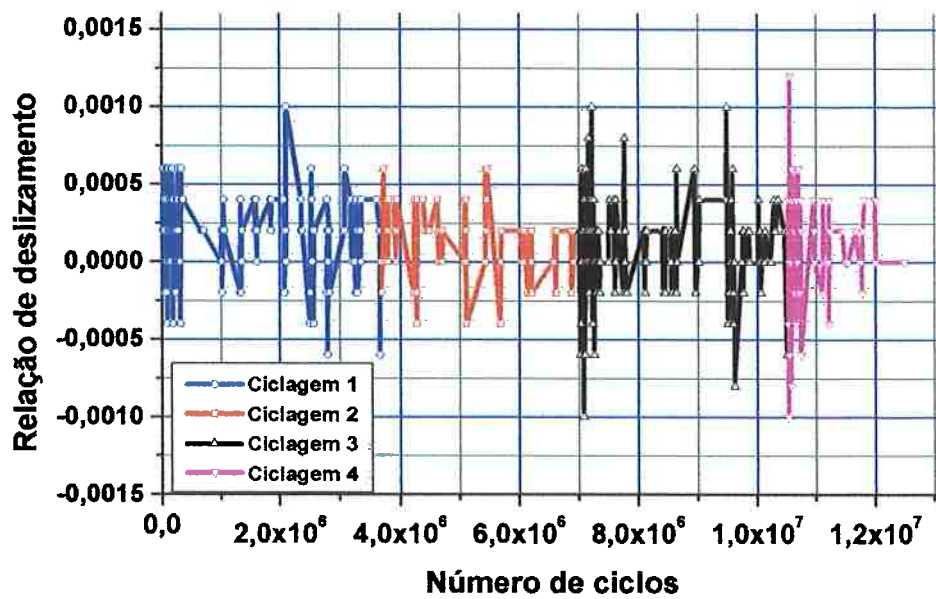
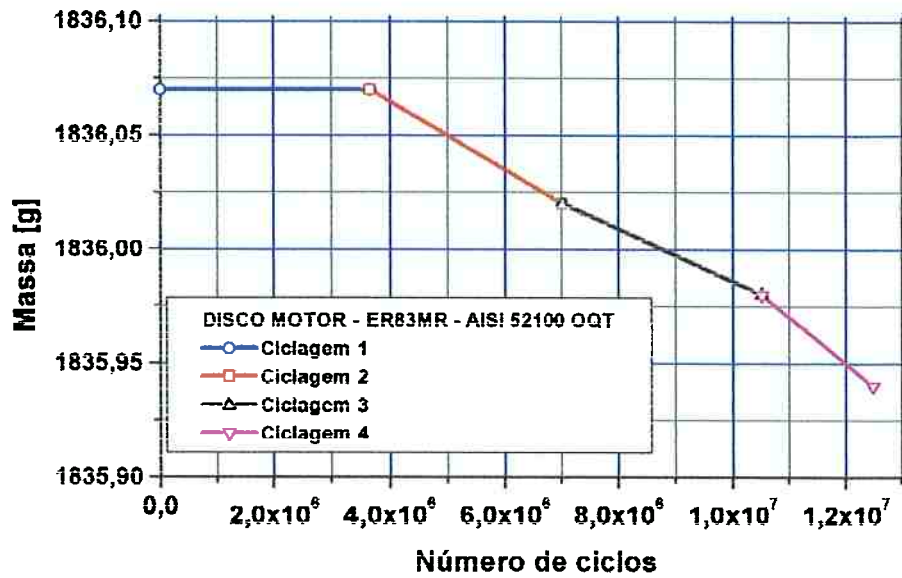


Figura 341. Gradiente de temperatura por ciclo e relação de deslizamento durante o ensaio ER83 dos discos de Aço AISI 52100 OQT (motor e movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO

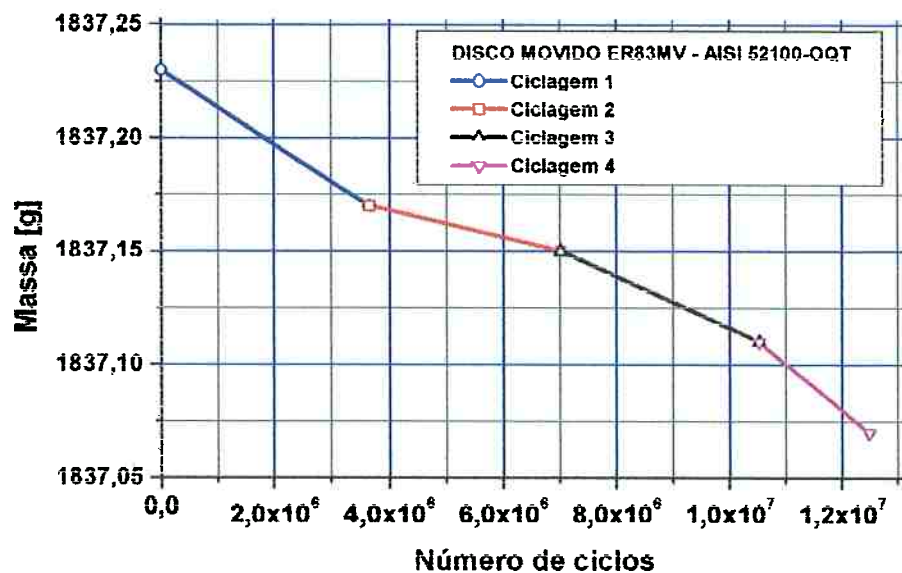


Figura 342. Perda de massa dos discos motor e movido durante o ensaio ER83 dos discos de Aço AISI 52100 OQT (motor e movido)

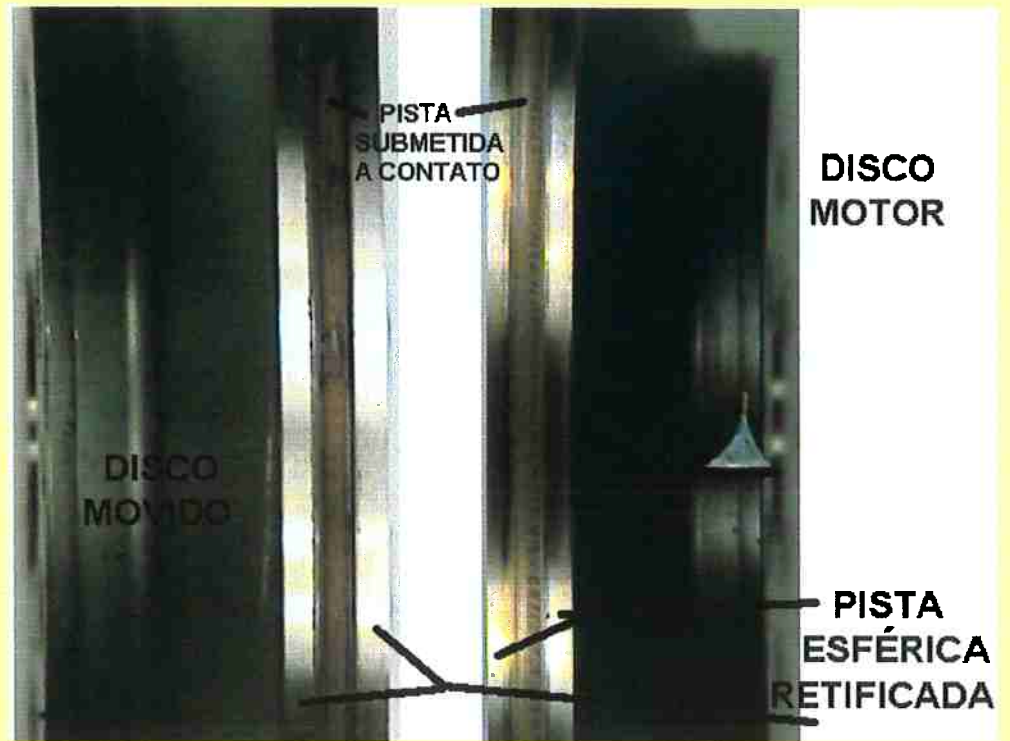


Figura 343. Desgaste das pistas motora e movida devido ao contato de rolamento durante o ensaio ER83 dos discos de Aço AISI 52100 OQT, após 3,7 Megaciclos (a seta indica o sentido de giro dos discos)

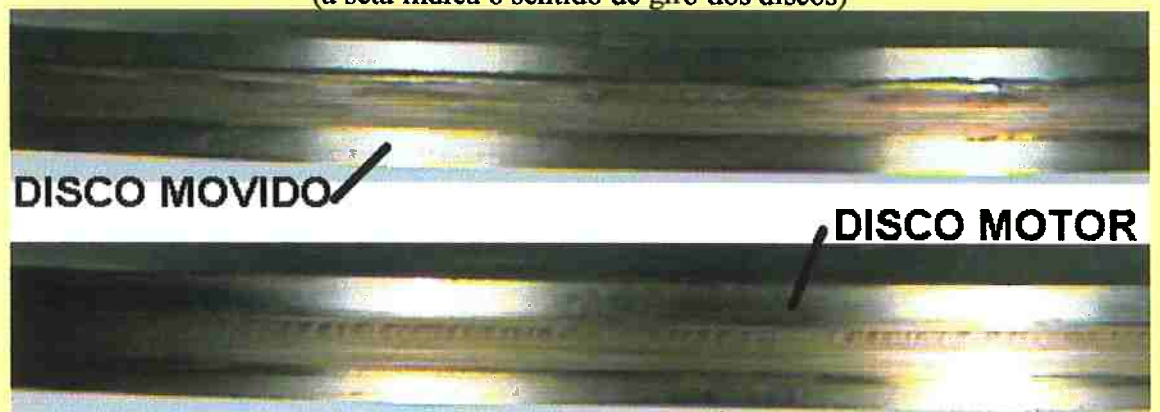


Figura 344. Desgaste das pistas motora e movida devido ao contato de rolamento durante o ensaio ER83 dos discos de Aço AISI 52100 OQT, após 12,7 Megaciclos

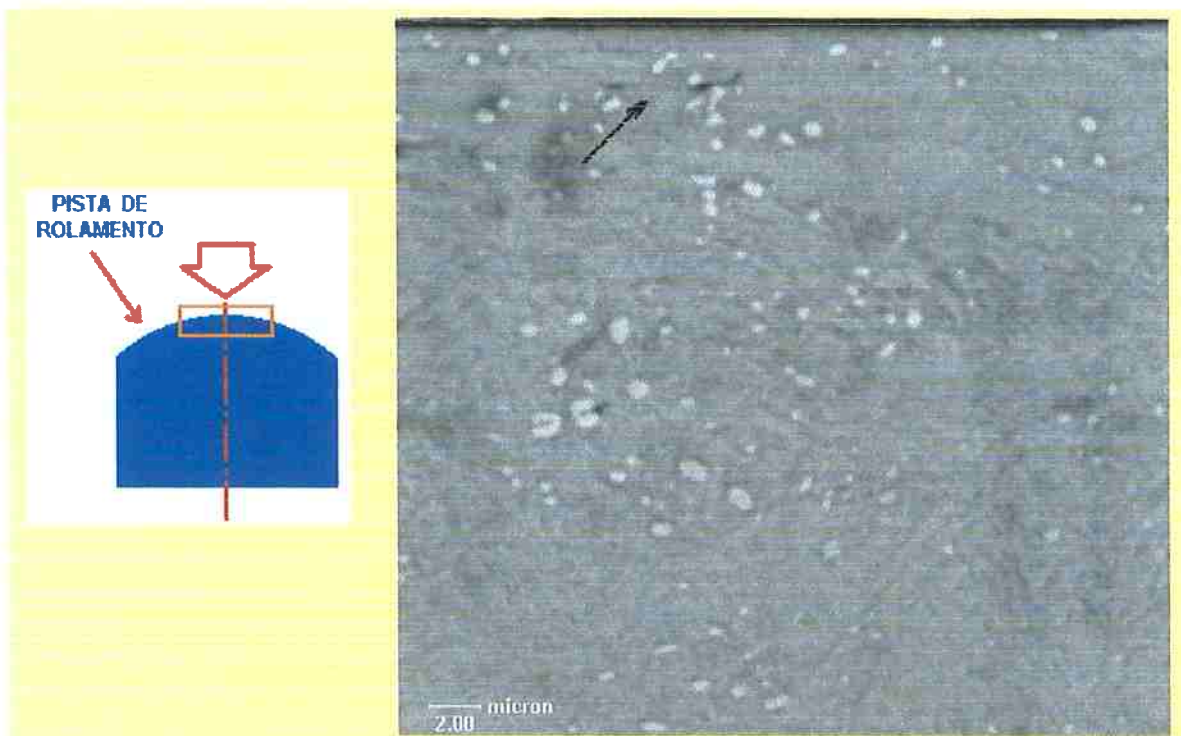


Figura 345. Foto de microscopia eletrônica de varredura da seção transversal do meio da pista movida (*retângulo no esquema*), com trinca paralela à pista, após o ensaio ER83

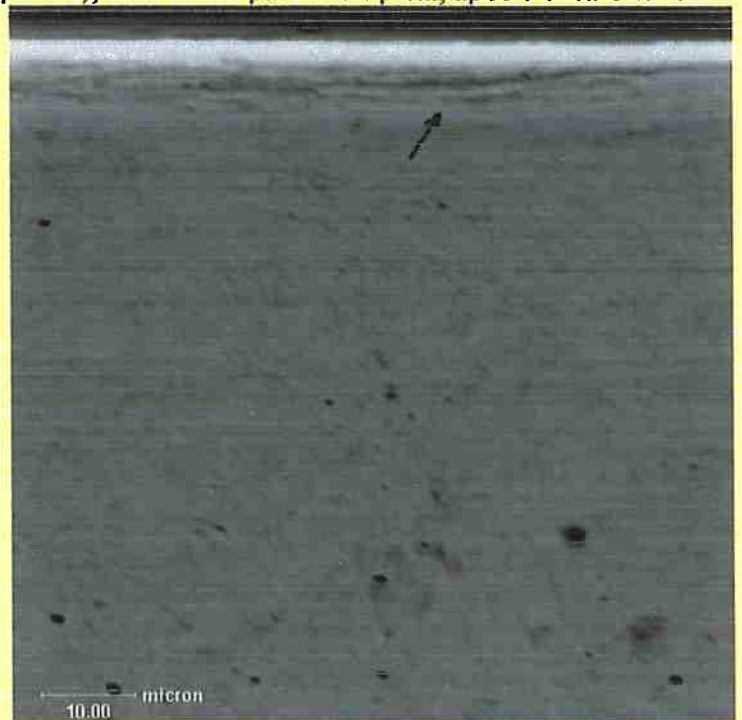


Figura 346. Foto de microscopia eletrônica de varredura da seção transversal do meio da pista movida (*retângulo no esquema*), com trincas paralela e inclinada em relação à pista, após o ensaio ER83

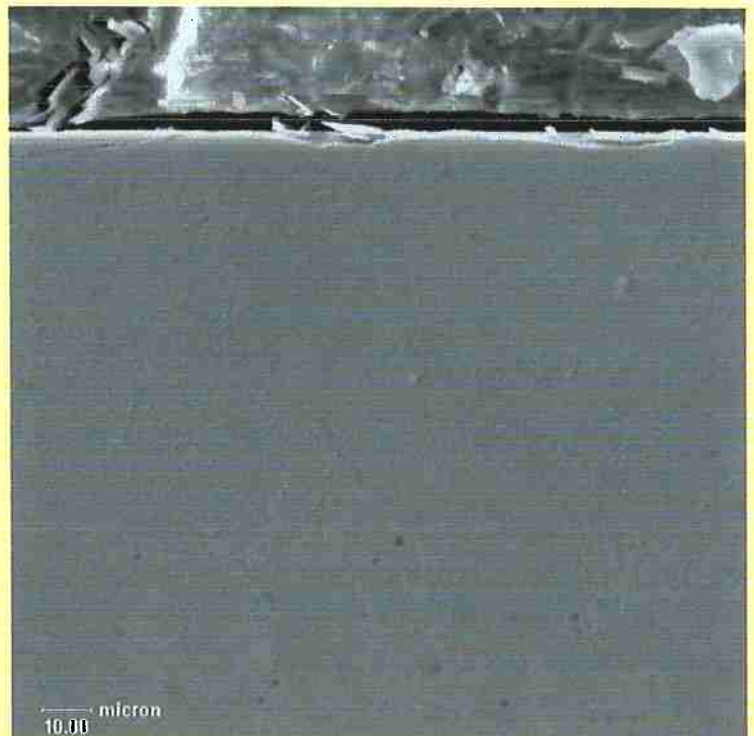
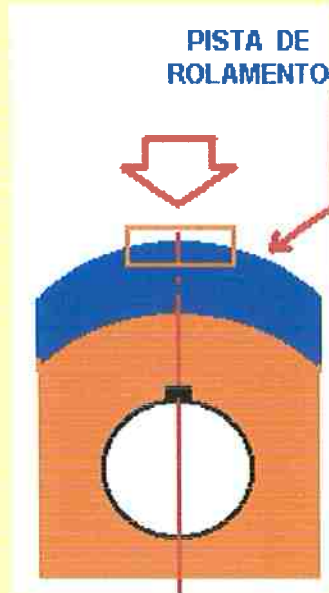


Figura 347. Foto de microscopia eletrônica de varredura da seção transversal, na direção circunferencial (*no retângulo do esquema*), do meio da pista motora de rolamento, após o ensaio ER83

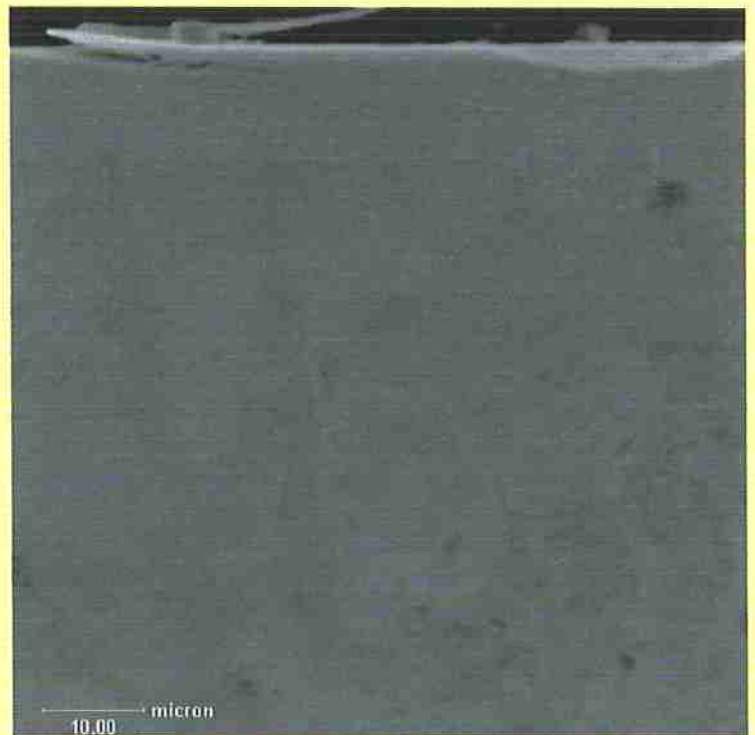
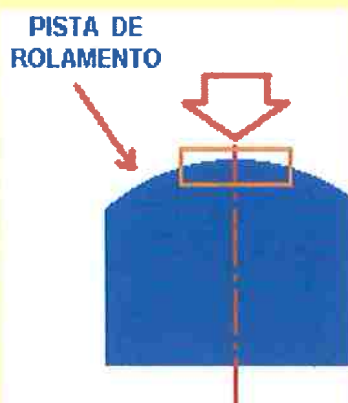
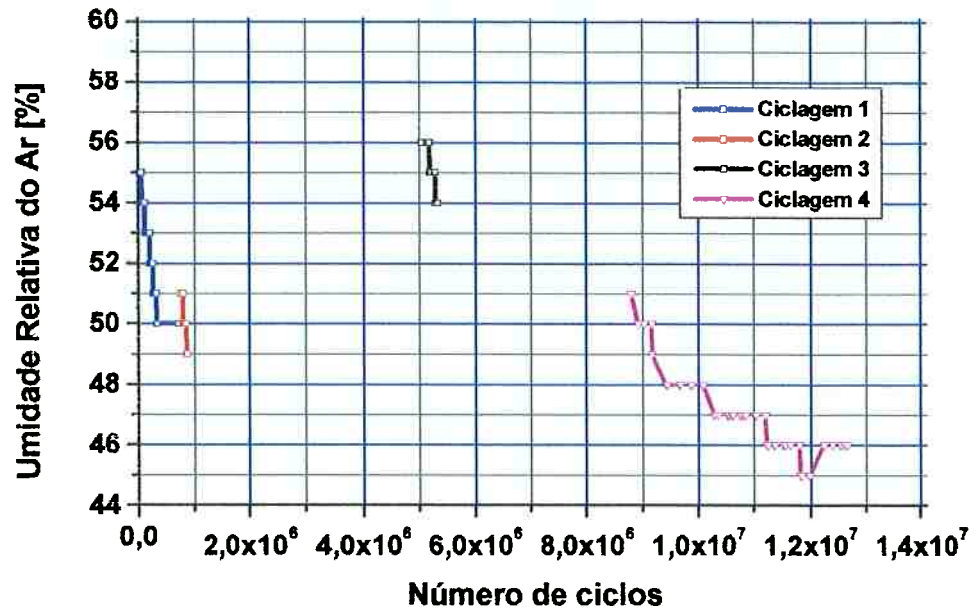


Figura 348. Aspecto de microtrinca na seção transversal do meio da pista motora de rolamento (*retângulo do esquema*), após o ensaio ER83

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO

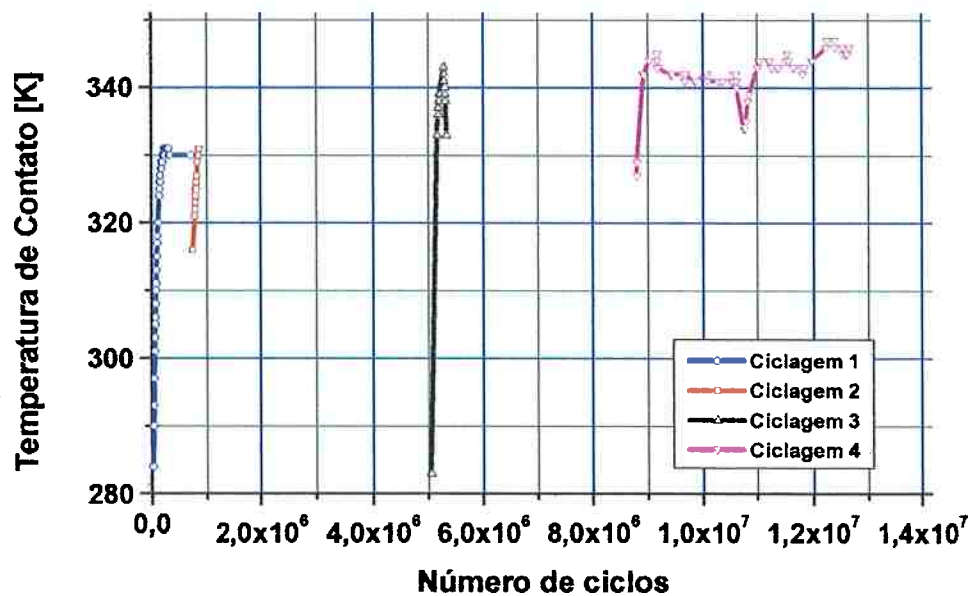
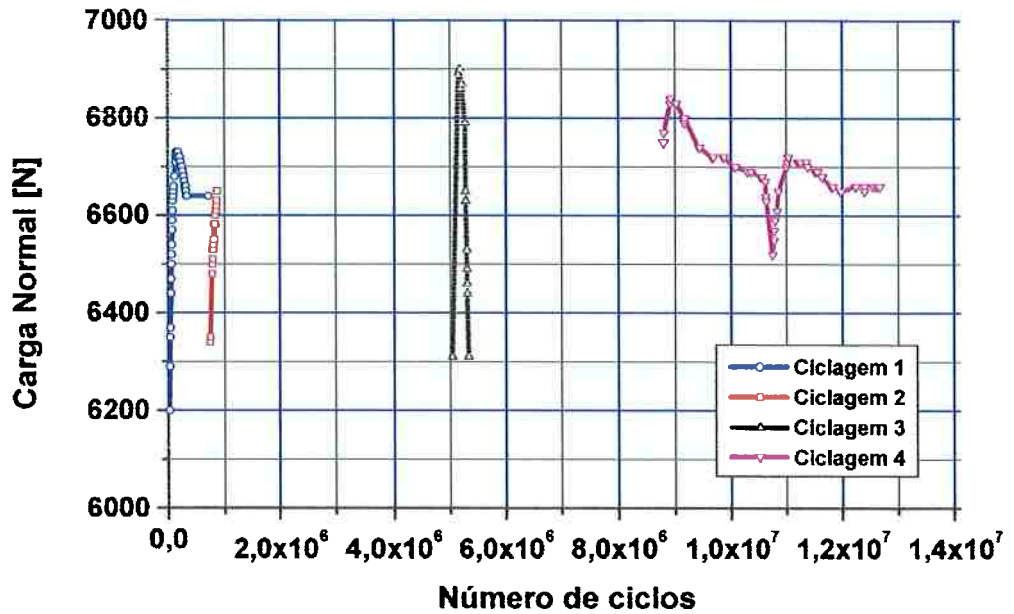


Figura 349. Evolução da umidade da sala e temperatura de contato durante o ensaio ER82 dos discos de Aço AISI 52100 SBQT (motor e movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO

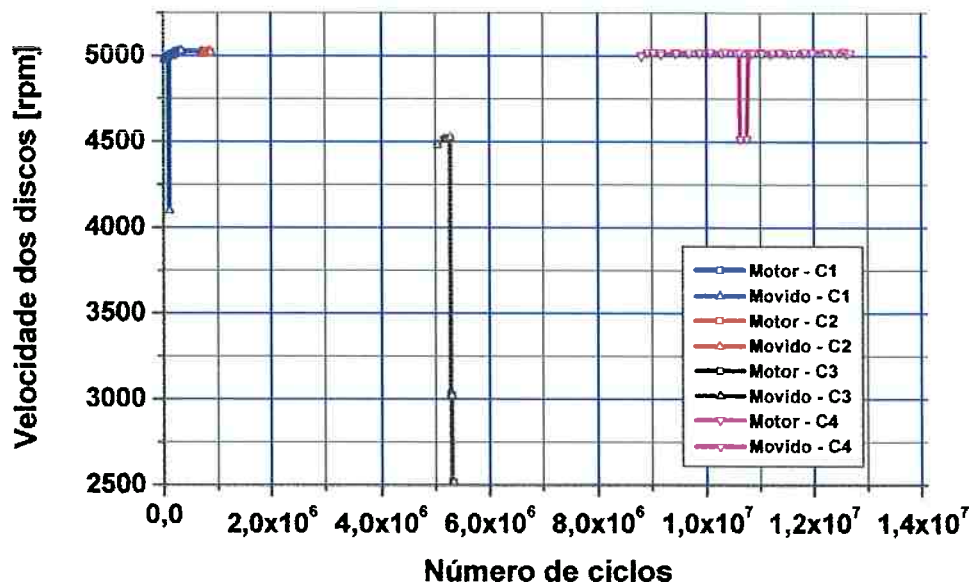
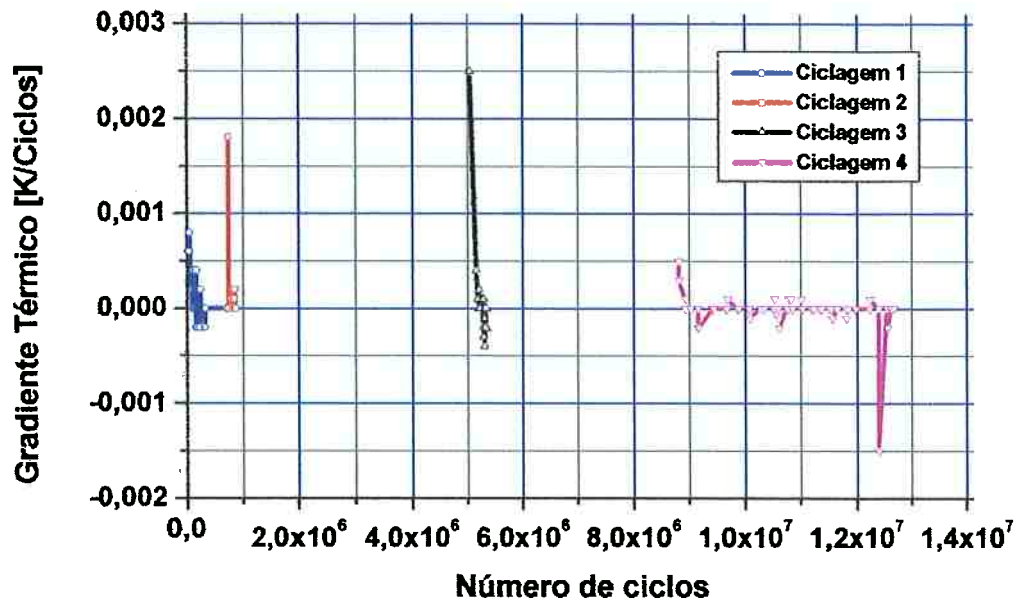


Figura 350. Evolução da carga normal de contato e velocidade durante o ensaio ER82 dos discos de Aço AISI 52100 SBQT (motor e movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO

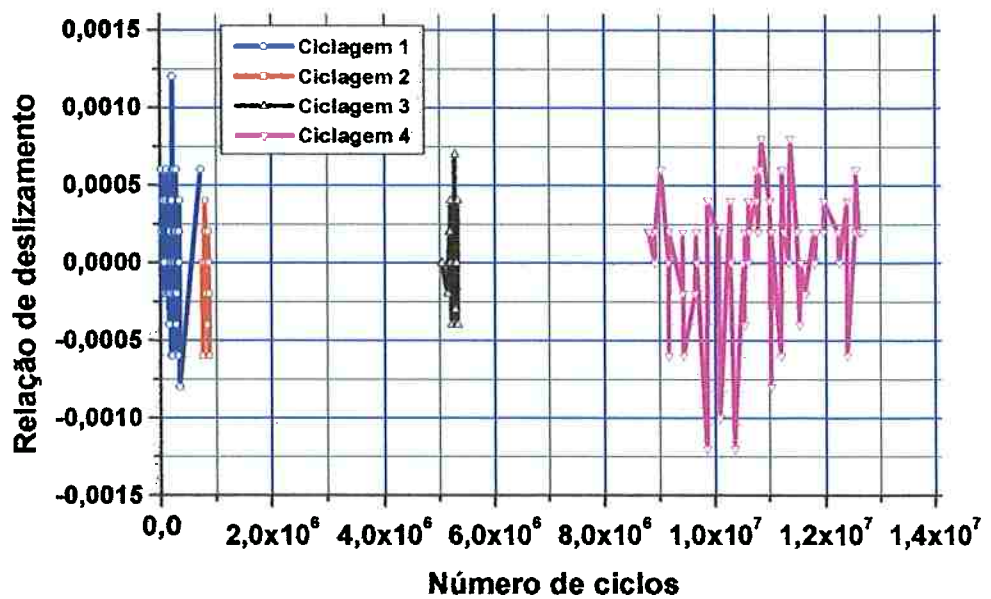
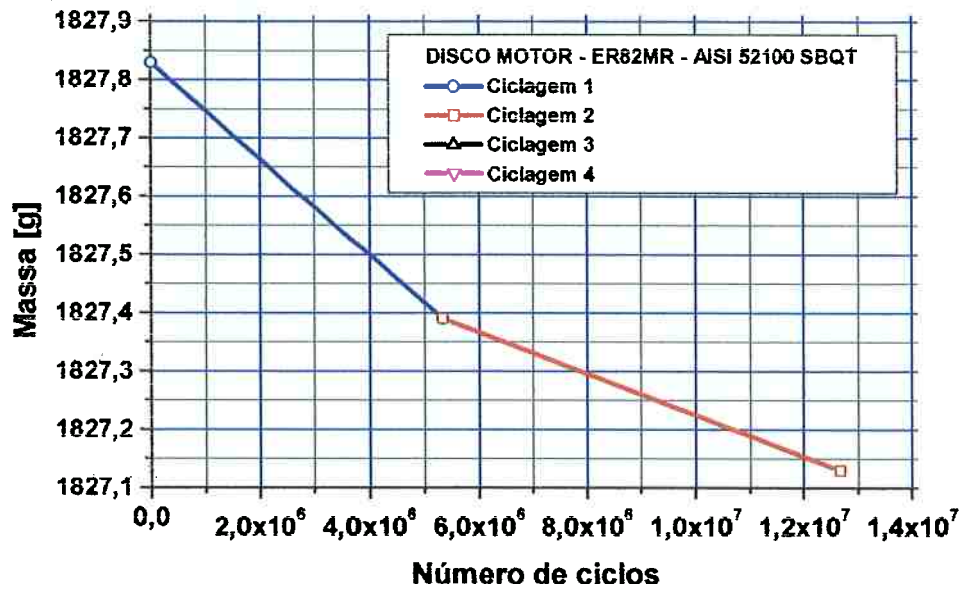


Figura 351. Gradiente de temperatura por ciclo e relação de deslizamento durante o ensaio ER82 dos discos de Aço AISI 52100 SBQT (motor e movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO

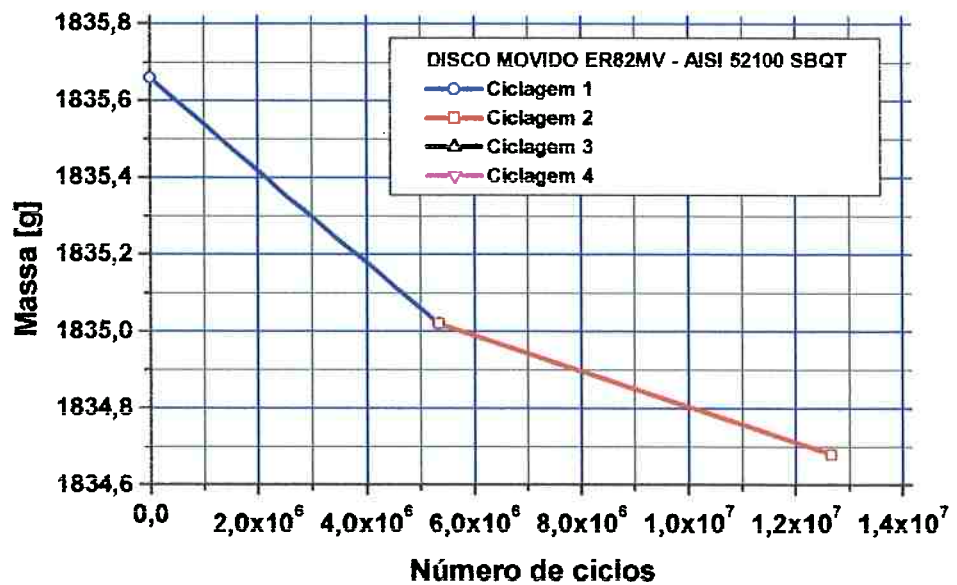


Figura 352. Perda de massa dos discos motor e movido durante o ensaio ER82 dos discos de Aço AISI 52100 SBQT (motor e movido)



Figura 353. Fotos de microscopia eletrônica de varredura do meio da pista do disco movido, após o ensaio ER82, evidenciando transição de comportamento frágil-dúctil da matriz de aço AISI 52100 OQT, em que zonas plasticamente deformadas e em processo de delaminação coexistem ao lado de malha de microtrincas

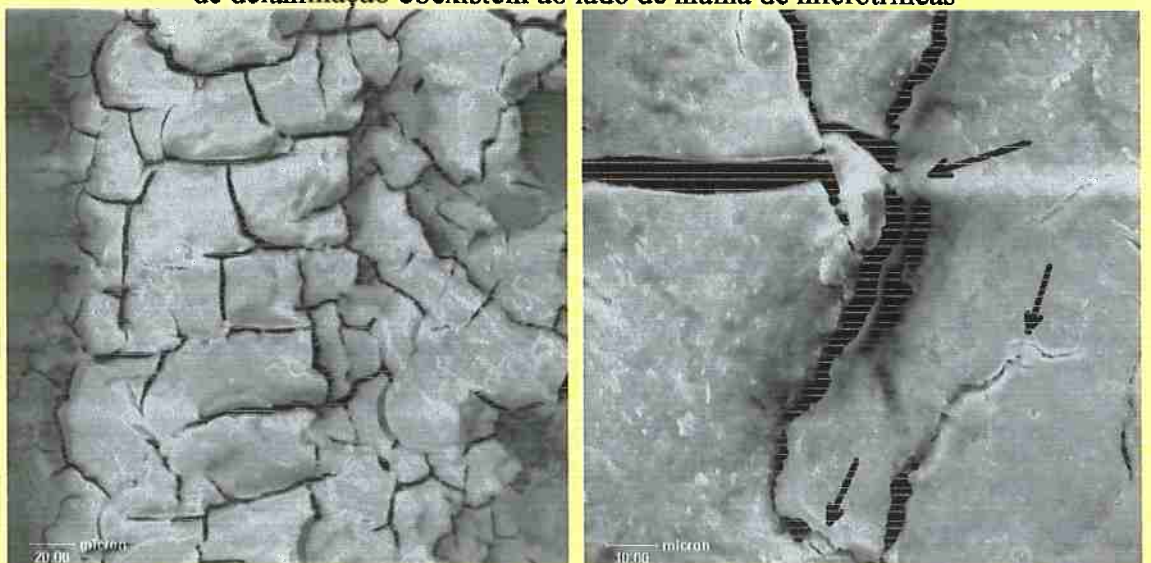
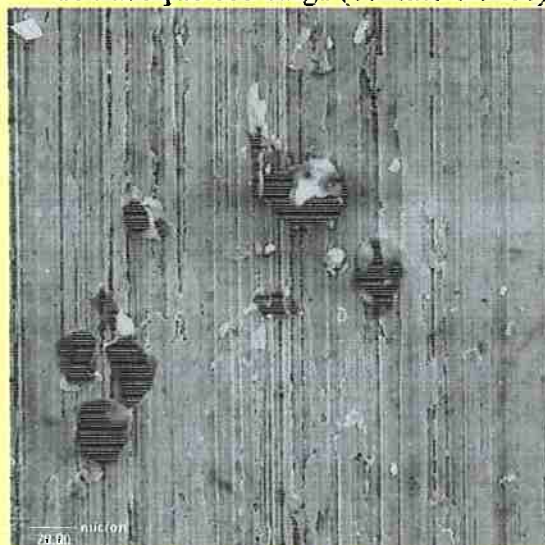


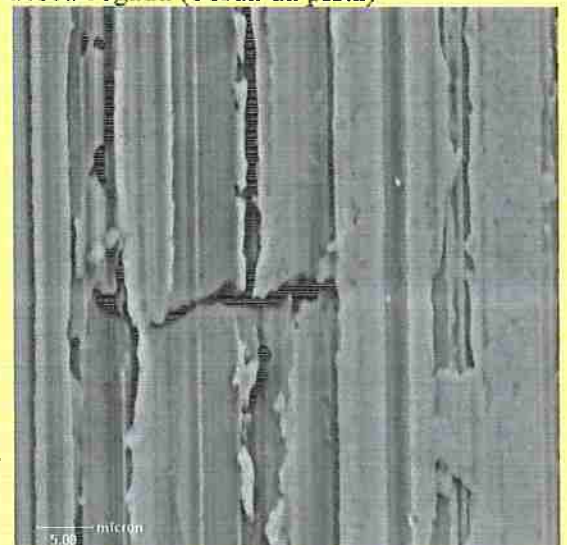
Figura 354. Evolução de malha de trincas na matriz, devido ao contato cíclico de rolamento, intensificadas próximo à borda em torno de partículas de segunda fase, durante o ensaio ER82 do disco movido de Aço AISI 52100 SBQT, após 12,7 Megaciclos



Figura 355. Foto de microscopia eletrônica de varredura da borda da pista movida, após o ensaio ER82, evidenciando expulsão por rolamento de “debris” da zona de contato, sua interação com microtrincas intensificadas pelos sulcos da retificação e pela zona de transição sob carga (contato cíclico) e descarregada (borda da pista)



BORDA DA PISTA SUJA, MAS SEM DANO APARENTE



MICROTRINCAS PARALELA E PISTA TRANSVERSAIS, BORDA DA PISTA

Figura 356. Evolução de danos na borda do contato de rolamento durante o ensaio ER82 do disco movido de Aço AISI 52100 SBQT, após 12,7 Megaciclos

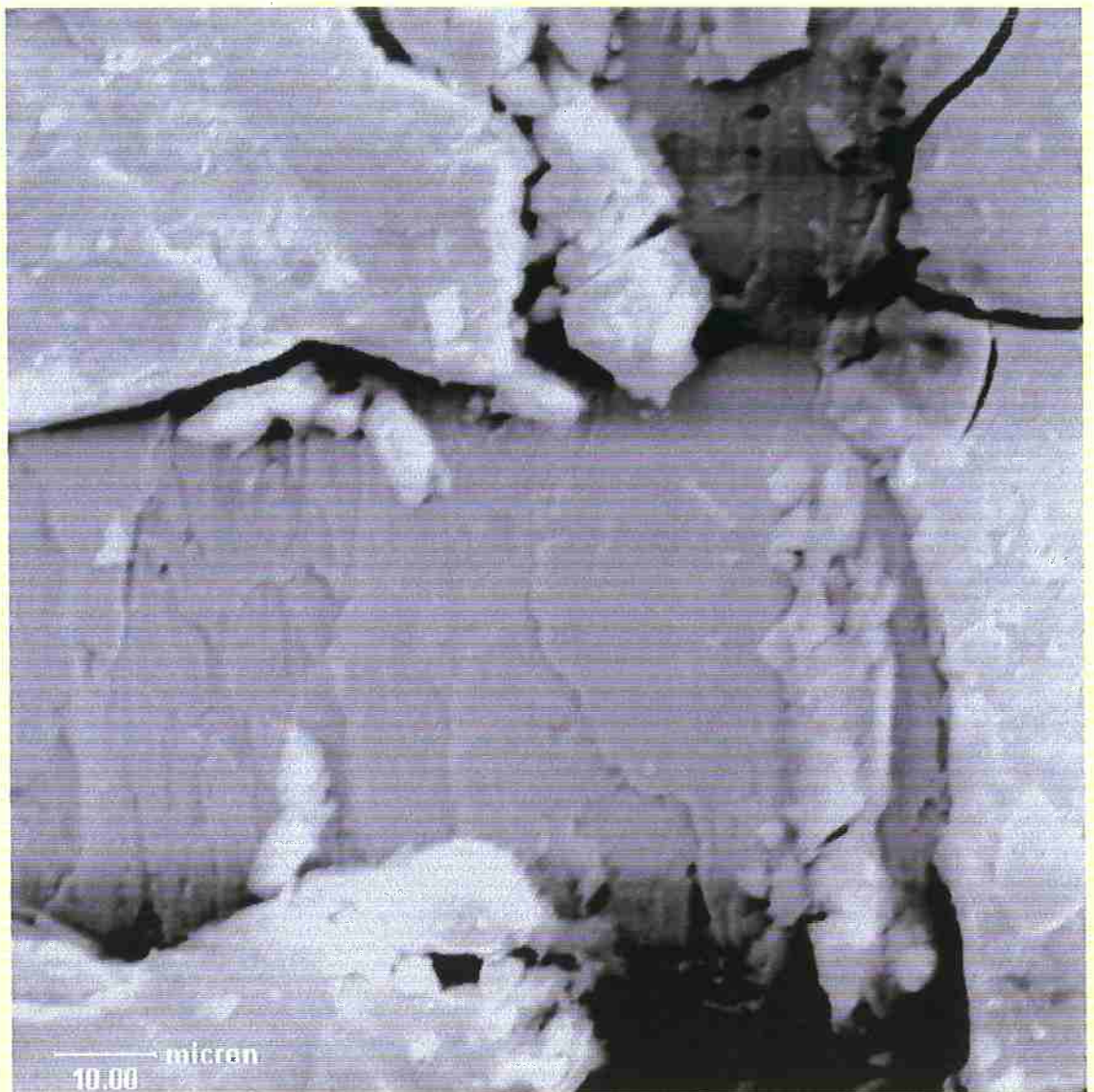
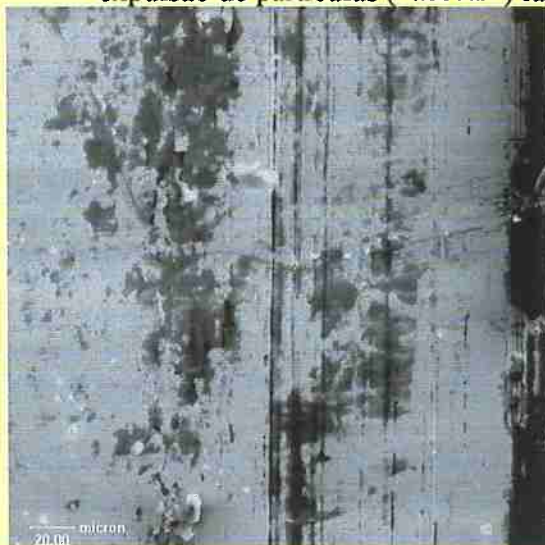


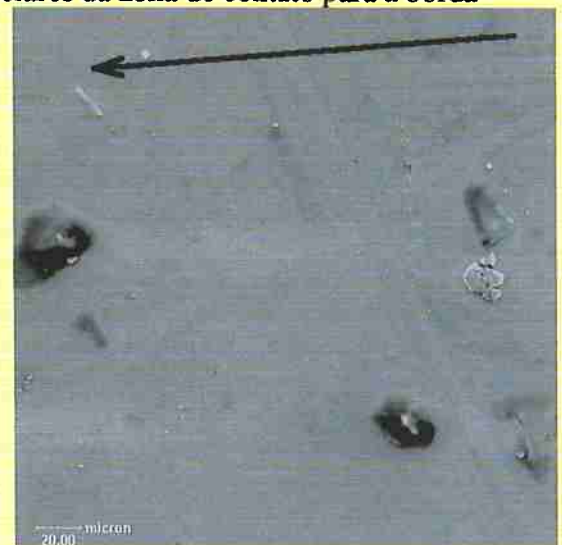
Figura 357. Zona de desgaste severo devido ao contato cíclico de rolamento seco, meio da pista, no ensaio ER82 do disco movido de Aço AISI 52100 SBQT, após 12,7 Megaciclos, percebendo-se dois mecanismos de desgaste subsequentes: no primeiro plano, *lascamento* (“*spalling*”), iniciado por trinca subsuperficial; mais ao fundo, *delaminação* em processo



Figura 358. Foto de microscopia eletrônica de varredura do meio da pista do disco movido, após o ensaio ER82, evidenciando zonas escuras (“*dark etching region*”) da matriz de aço AISI 52100 SBQT, possivelmente decorrentes da sobrecarga devido à expulsão de partículas (“*debris*”) lamelares da zona de contato para a borda



PISTA – BORDA



PARTÍCULAS EXPULSAS DO DISCO ANTAGONISTA E EM PROCESSO DE DESLOCAMENTO NA PISTA

Figura 359. Zonas pontuais escuras (“DER, *dark etching regions*”) na pista de rolamento, ensaio ER82 do disco movido de Aço AISI 52100 SBQT, após 12,7 Megaciclos, 2,33 GPa

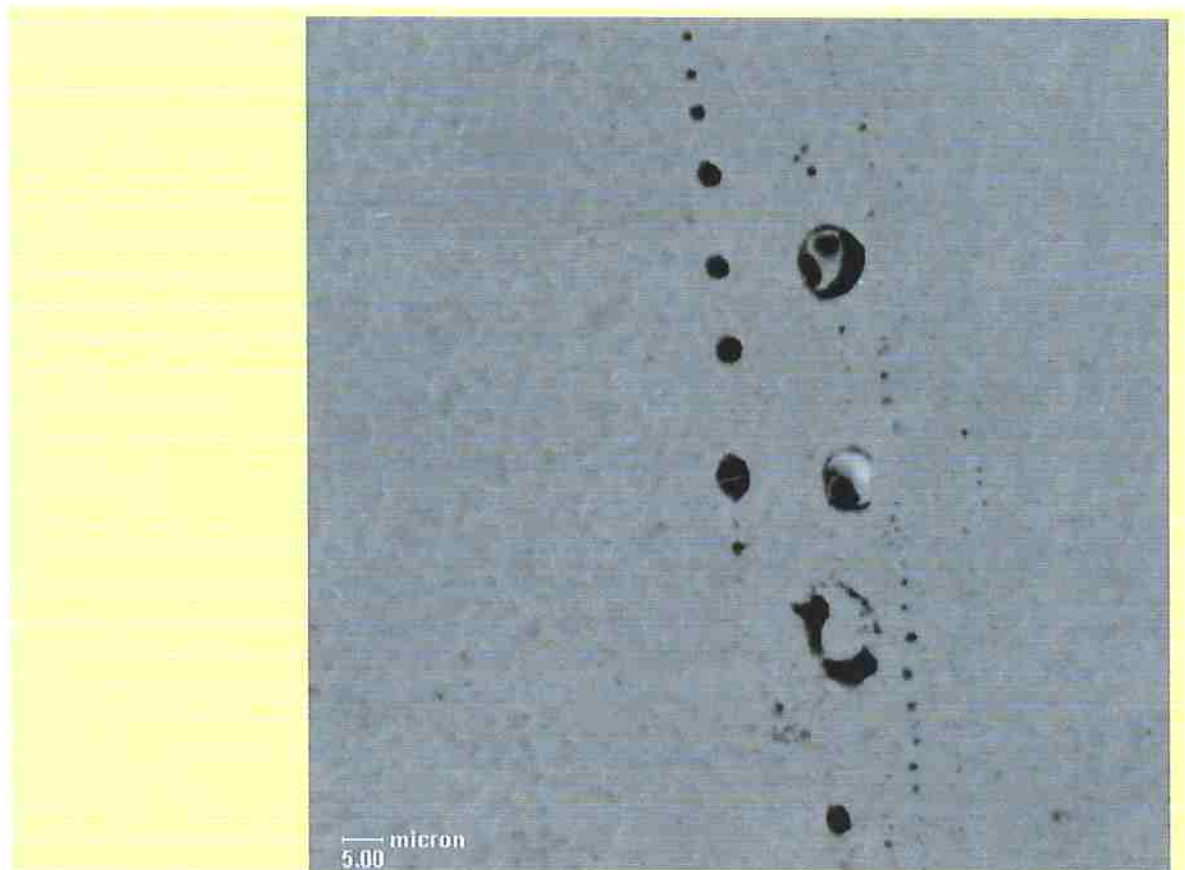
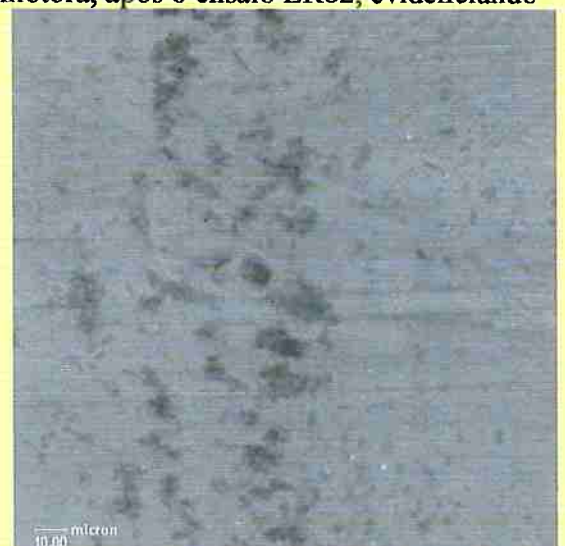


Figura 360. Indentação cíclica por partícula dura de “debris” na zona de contato. Foto de microscopia eletrônica de varredura da pista motora, após o ensaio ER82, evidenciando



MEIO DA PISTA, GÊNESE DA MALHA DE TRINCA TÉRMICA NO FUNDO DE UM PITE DE $\phi 6\mu\text{m}$



ZONA ESCURA (“dark etching region”)

Figura 361. Evolução de danos na zona de contato de rolamento do disco motor de Aço AISI 52100 SBQT, no ensaio ER82, após 12,7 Megaciclos

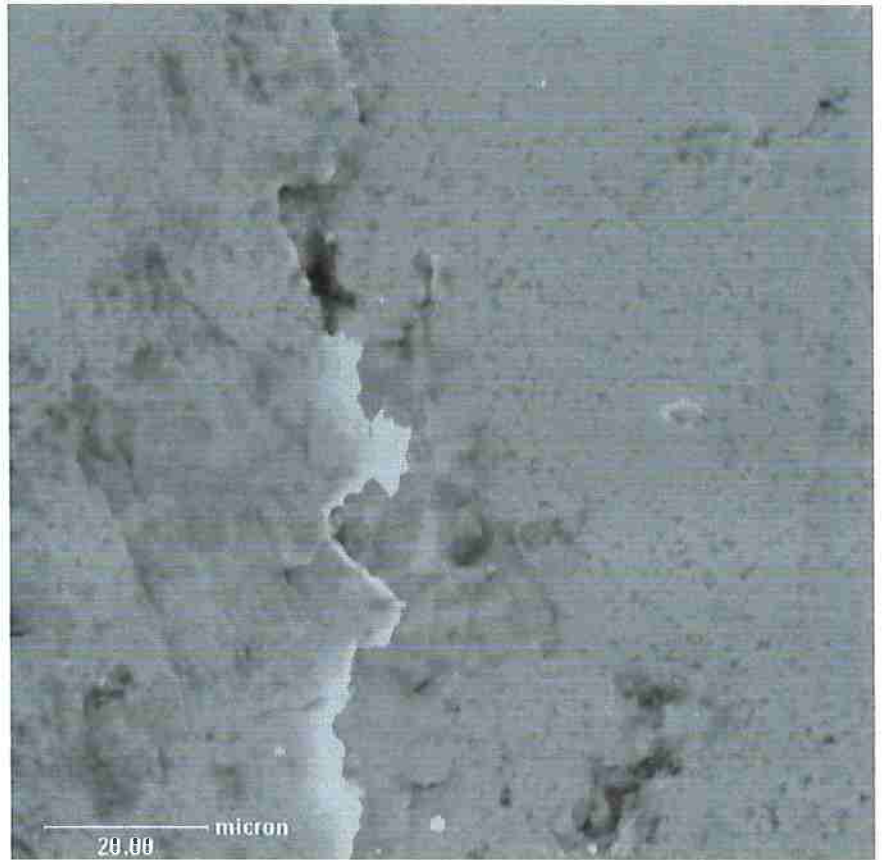
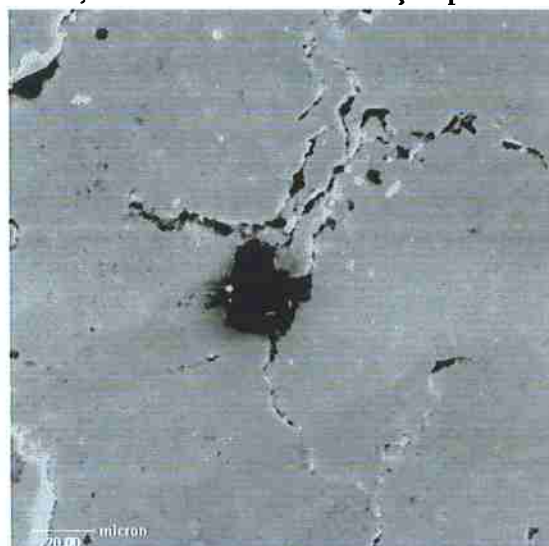
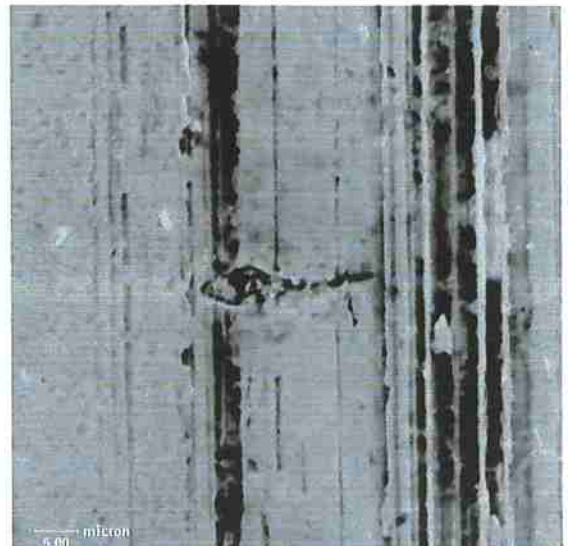


Figura 362. Foto de microscopia eletrônica de varredura da pista motora, após o ensaio ER82, com indício de deformação plástica da zona de contato



MEIO DA PISTA, GÊNESE DE DANO EM "BORBOLETA", COMPORTAMENTO FRÁGIL



MICROTRINCA TRANSVERSAL AOS SULCOS DA BORDA DA PISTA E POR INDENTAÇÃO DE CARBONETO

Figura 363. Evolução de danos na borda do contato de rolamento durante o ensaio ER82 do disco motor de Aço AISI 52100 SBQT, após 12,7 Megaciclos



No círculo: PARTÍCULA EXPULSA DO CONTRACORPO E EM PROCESSO DE ROLAMENTO "FRETING", (AMPLITUDE DE MOVIMENTO DA PARTÍCULA NA ZONA ESCURA, 15 μm) E POSICIONAMENTO ROTACIONAL RUMO AO ÂNGULO DE SAÍDA

Figura 364. Evolução de pites e zona escura na pista motora de Aço AISI 52100 SBQT, devido ao contato cíclico de rolamento, durante o ensaio ER82, após 12,7 Megaciclos

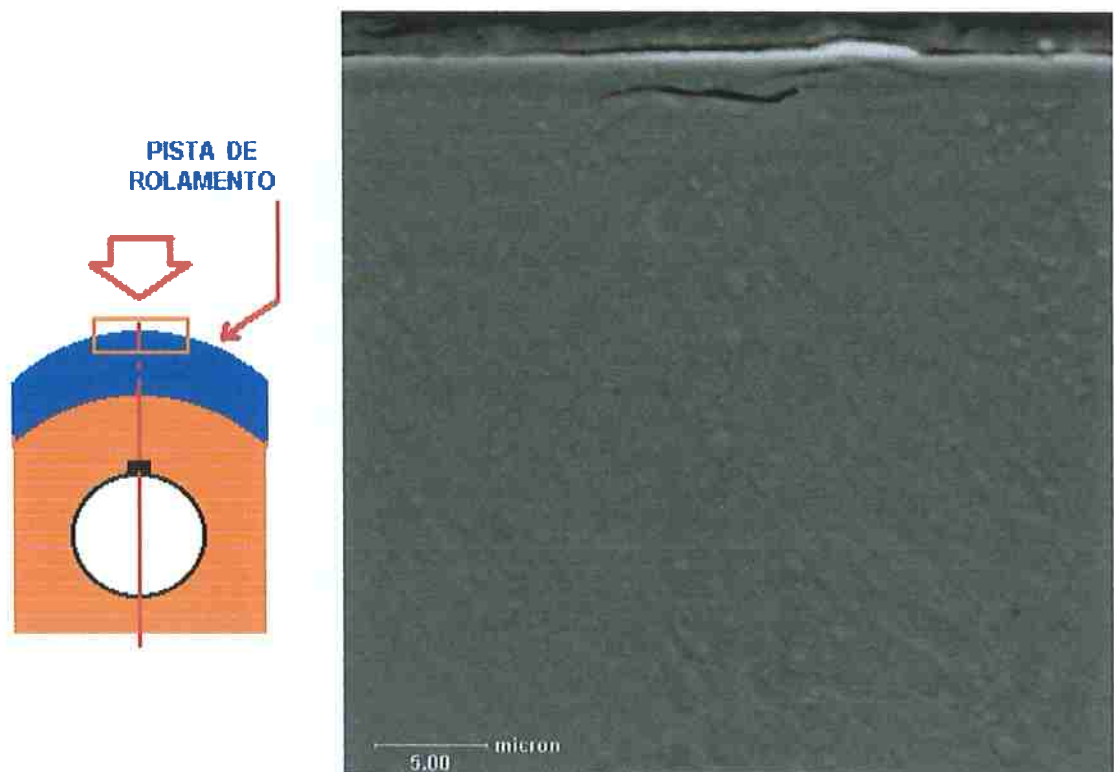


Figura 365. Foto de microscopia eletrônica de varredura da seção circunferencial sob o meio da pista motora, após o ensaio ER82, com microtrincas nucleadas na subsuperfície

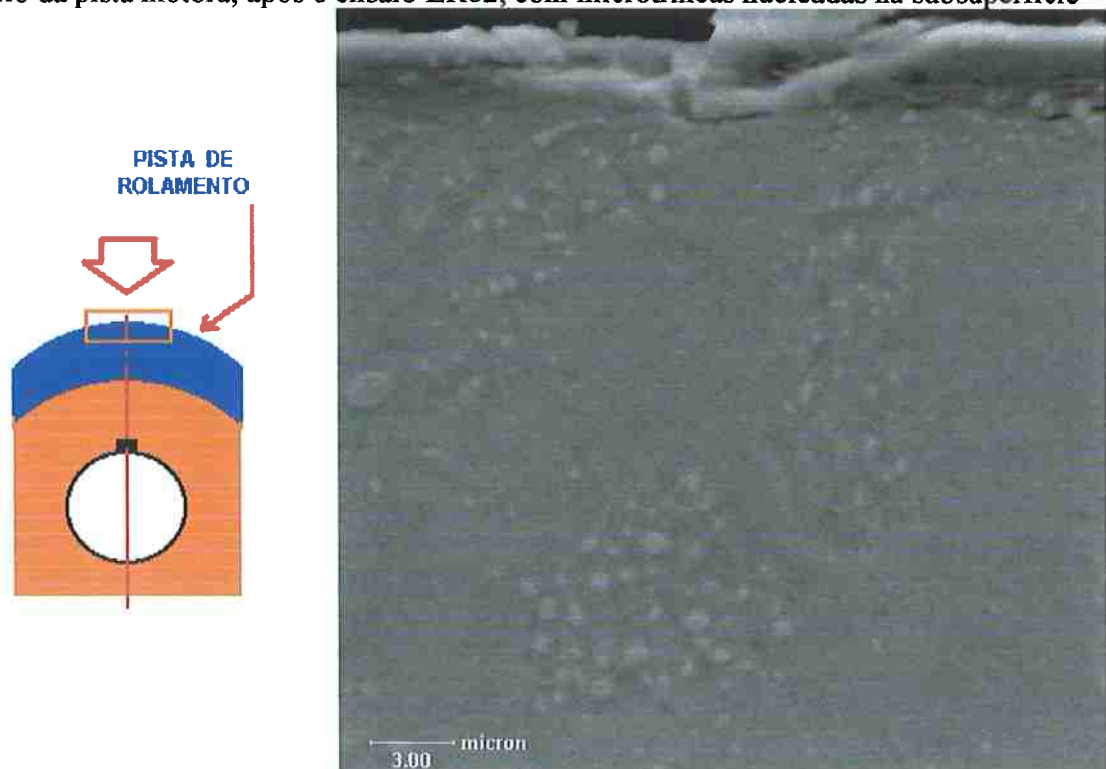


Figura 366. Evolução de danos na borda do contato de rolamento durante o ensaio ER82 do disco motor de Aço AISI 52100 SBQT, após 12,7 Megaciclos

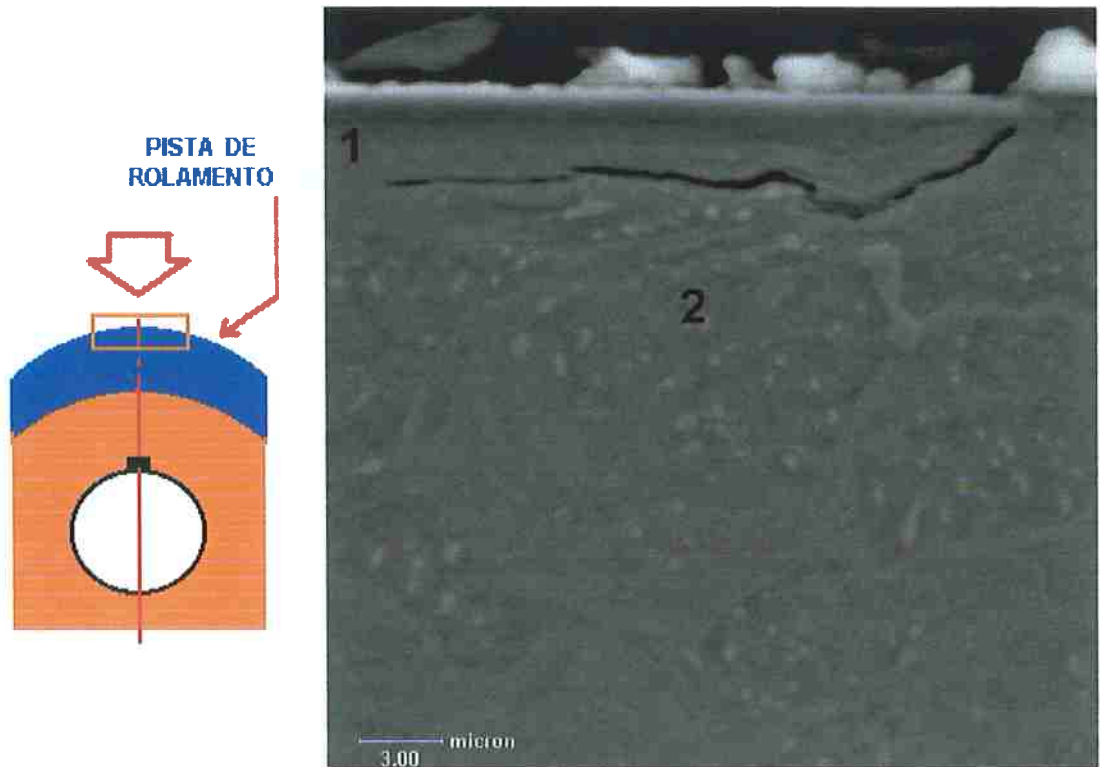


Figura 367. Trinca subsuperficial indicando a zona de máxima tensão de cisalhamento a 3 μm da pista motora de Aço AISI 52100 SBQT, separa a zona (1), de carbonetos dissolvidos, da zona (2), onde estão dispersos



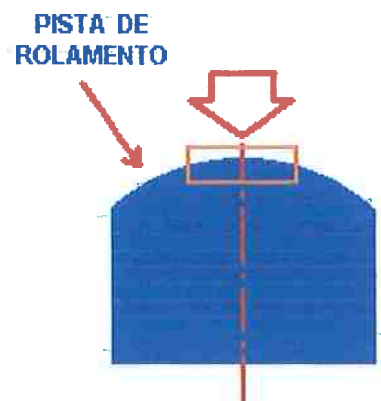
MICROTRINCA 3 μm ABAIXO DA PISTA MOTORA

MICROTRINCA PARALELA (1) À PISTA E EXTRUSÃO (2) DA MATRIZ EM DIREÇÃO À PISTA

Figura 368. Ausência de trincas 10 μm abaixo da pista de contato de rolamento durante o ensaio ER82 do disco motor de Aço AISI 52100 SBQT, após 12,7 Megaciclos, e presença de trincas próximas à pista e extrusão a partir de uma inclusão de MnS



Figura 369. Trinca nucleada por intensificação da tensão na zona de transição da pista com e sem contato de rolamento, disco movido de Aço AISI 52100 SBQT, ensaio ER82, após 12,7 Megaciclos (Seção transversal da coroa circular)



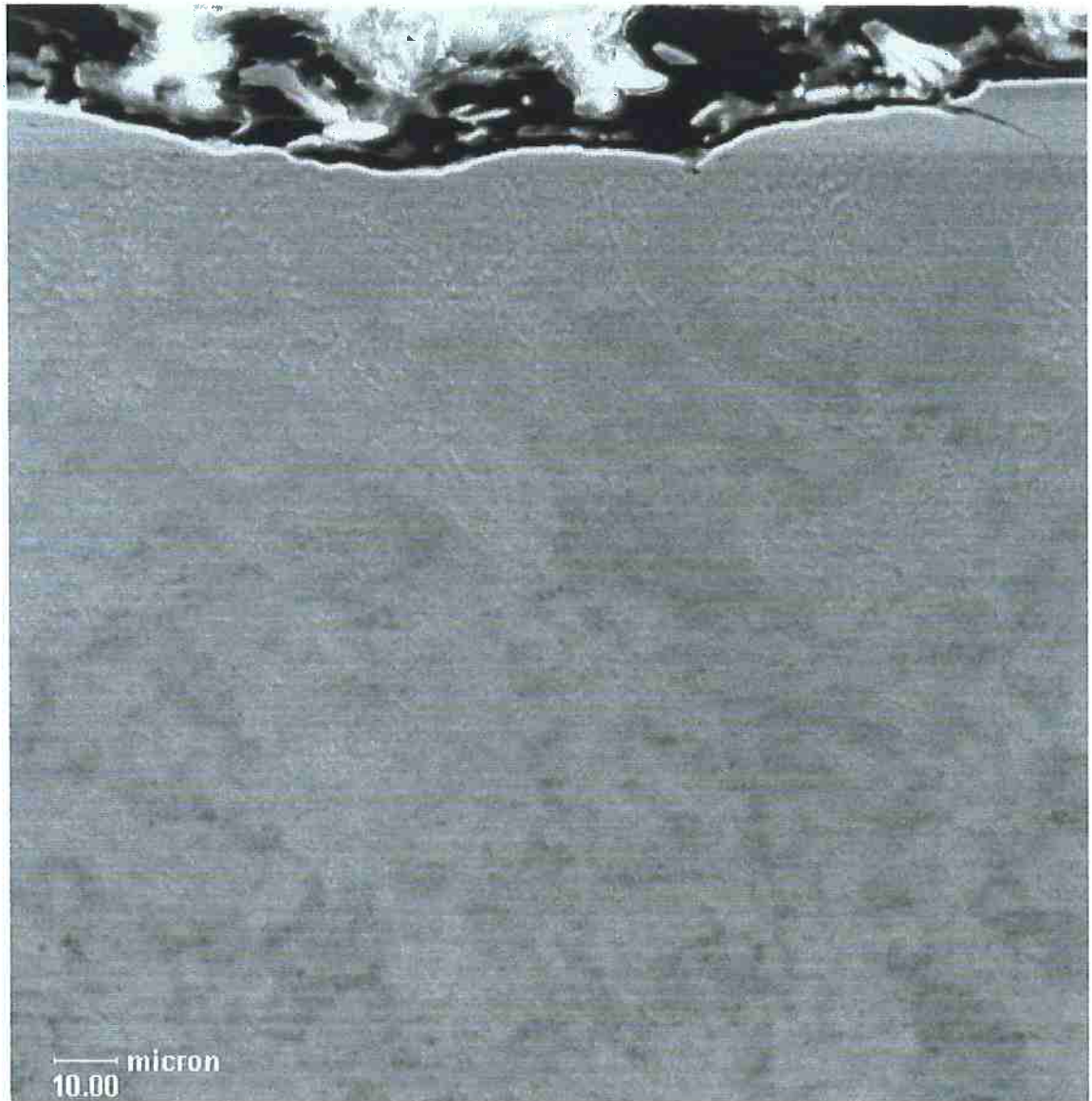
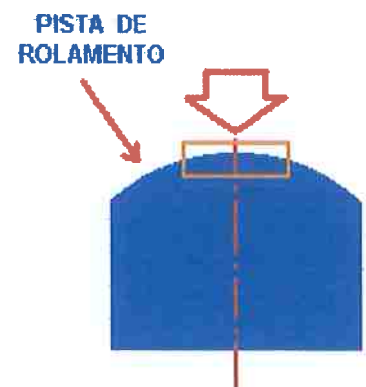


Figura 370. Trinca nucleada por intensificação da tensão na zona de transição da pista com e sem contato de rolamento, disco motor de Aço AISI 52100 SBQT, ensaio ER82, após 12,7 Megaciclos (Seção transversal da coroa circular)



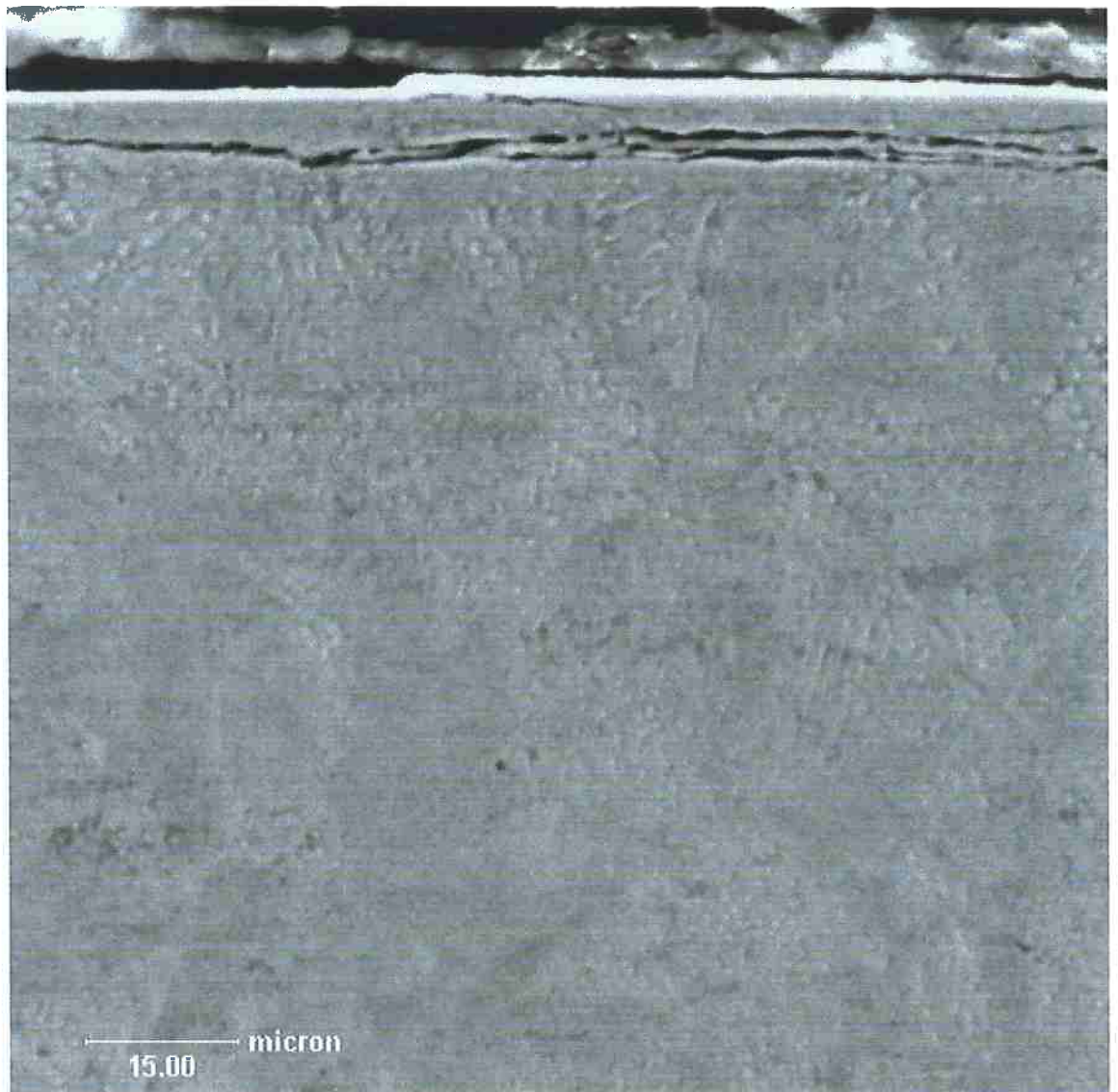
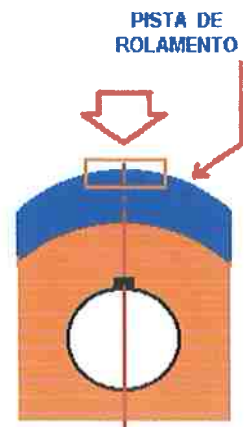


Figura 371. Trincas nucleadas e ramificadas por intensificação da tensão de cisalhamento na zona subsuperficial da pista de rolamento cíclico (paralela à pista) e pelo atrito (inclinada), disco motor de Aço AISI 52100 SBQT, ensaio ER82, após 12,7 Megaciclos (meio da seção circunferencial da coroa circular)



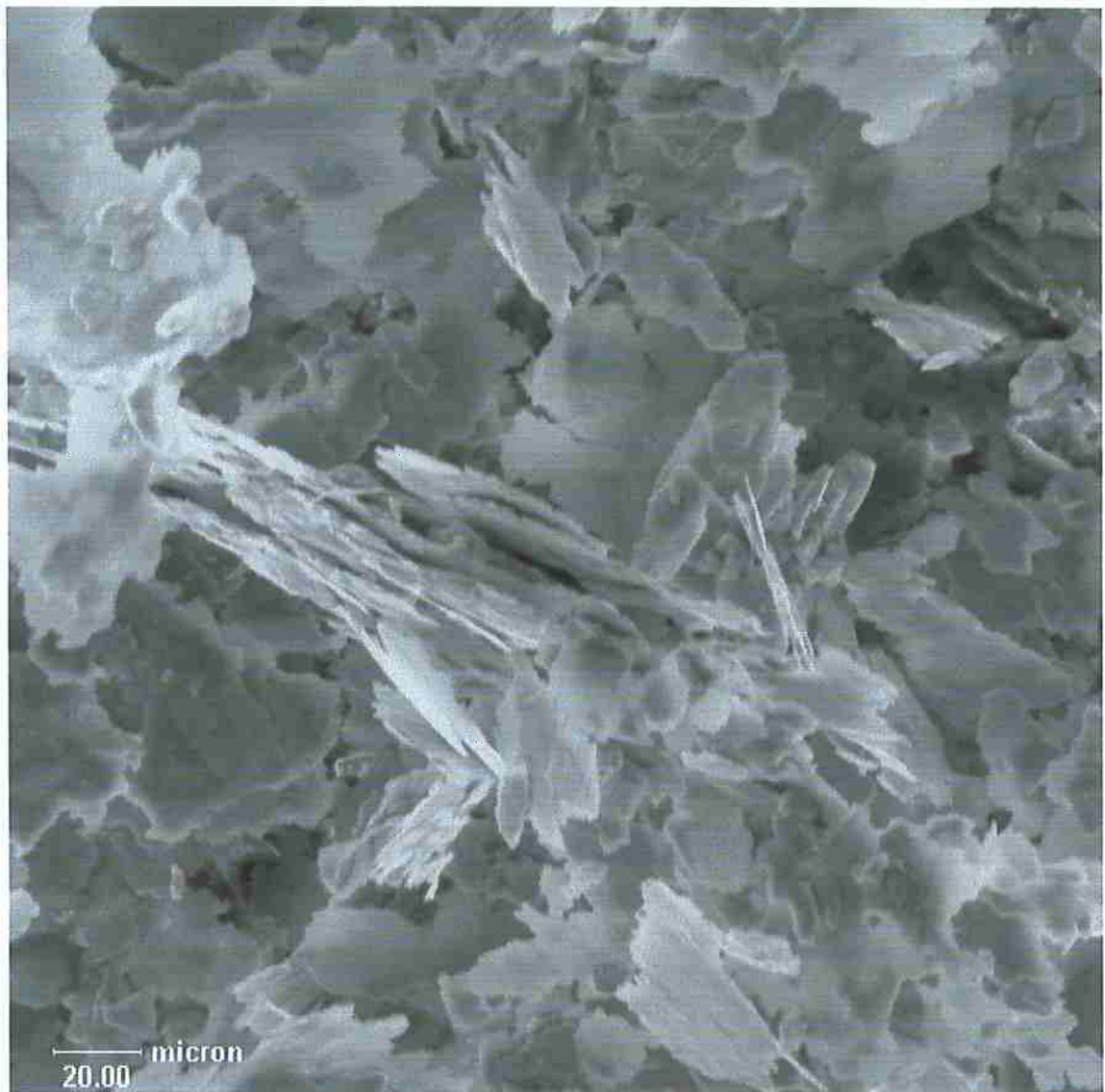


Figura 372. Foto de microscopia eletrônica (SEM-SE) de partículas (“debris”) desprendidos das pistas motora e movida de Aço AISI 52100 SBQT, entre o início e 715 mil ciclos do ensaio ER82, evidenciando mecanismo de delaminação, observando-se lamelas de $50 \mu\text{m}^2$ a $600 \mu\text{m}^2$, com espessura entre 1 e $4 \mu\text{m}$

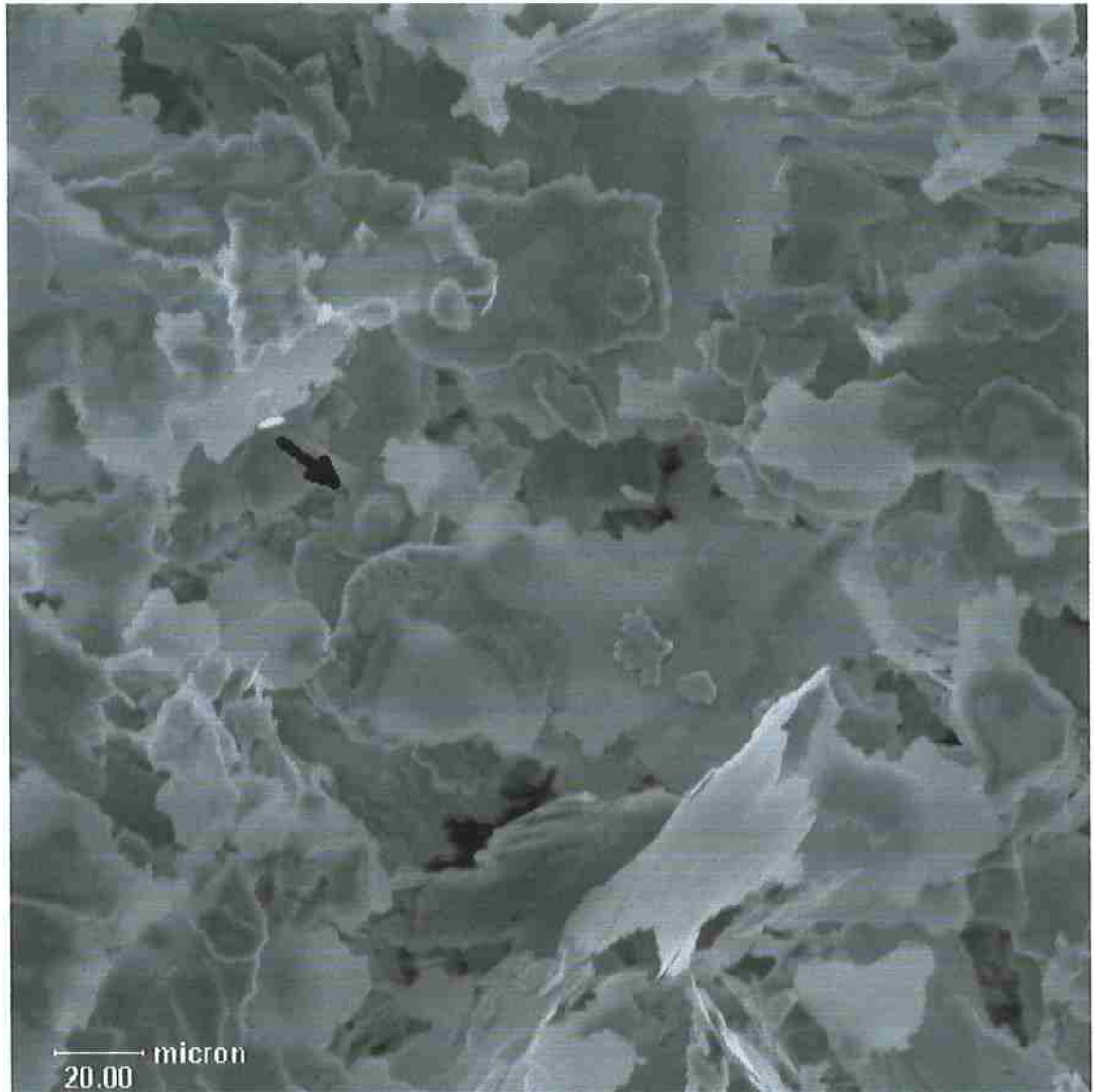
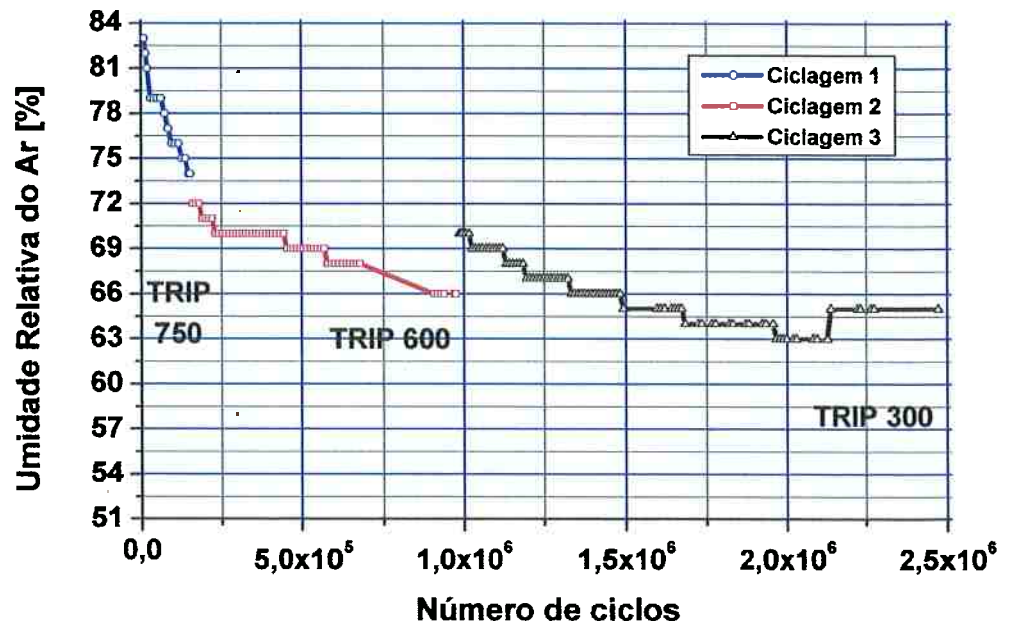


Figura 373. Foto de microscopia eletrônica (SEM-SE) de partículas (“debris”) desprendidos das pistas motora e movida de Aço AISI 52100 SBQT, entre o início e 715 mil ciclos do ensaio ER82, evidenciando mecanismo de delaminação, observando-se lamelas de $50 \mu\text{m}^2$ a $600 \mu\text{m}^2$, com espessura entre 1 e 4 μm , e microesferas (seta) com, no máximo, 16 μm de diâmetro

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO

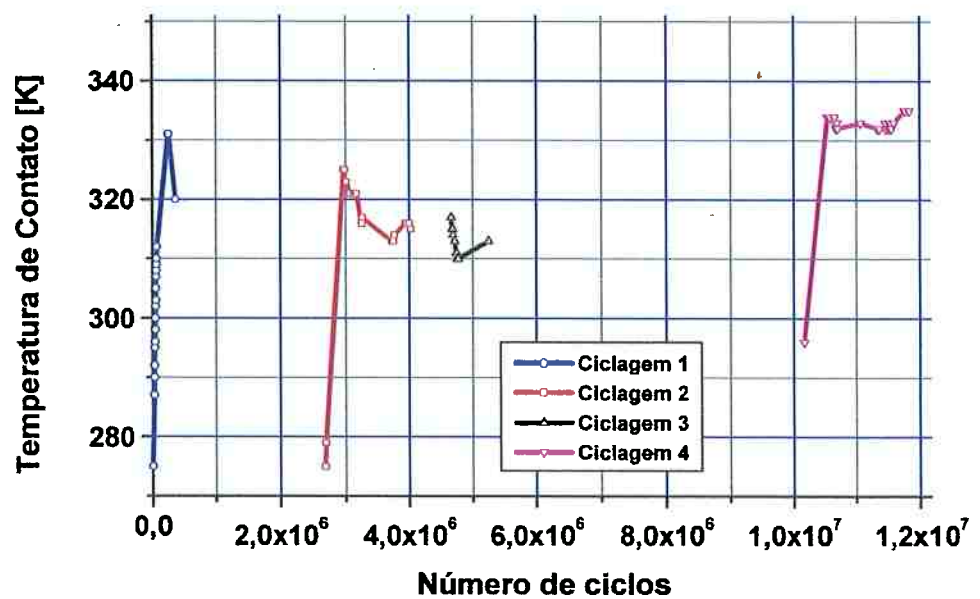
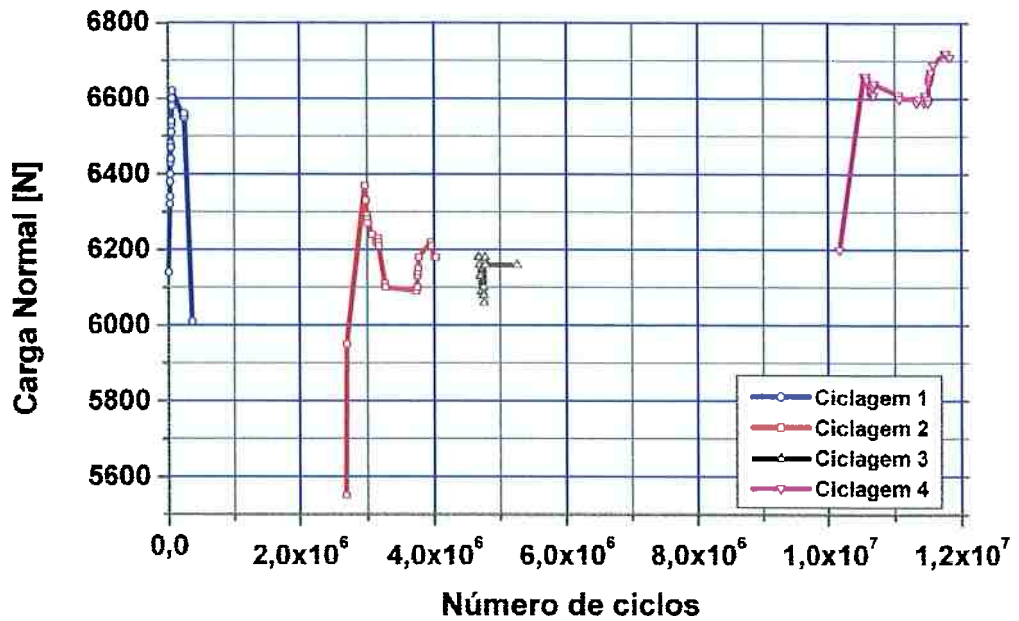


Figura 374. Evolução da umidade da sala e temperatura de contato durante o ensaio ER81 dos discos de Aço AISI 52100 SBQT (motor) e AISI 52100 OQT (movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO

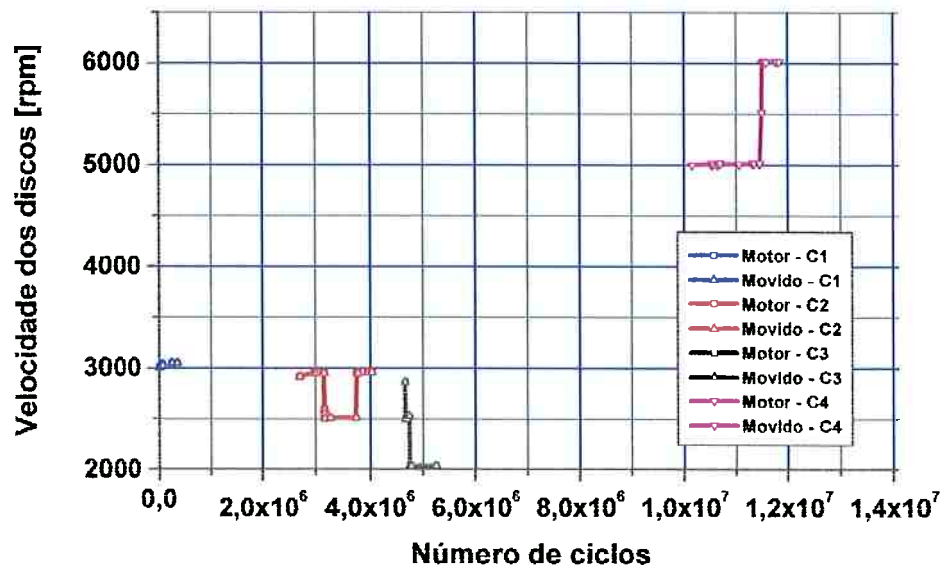
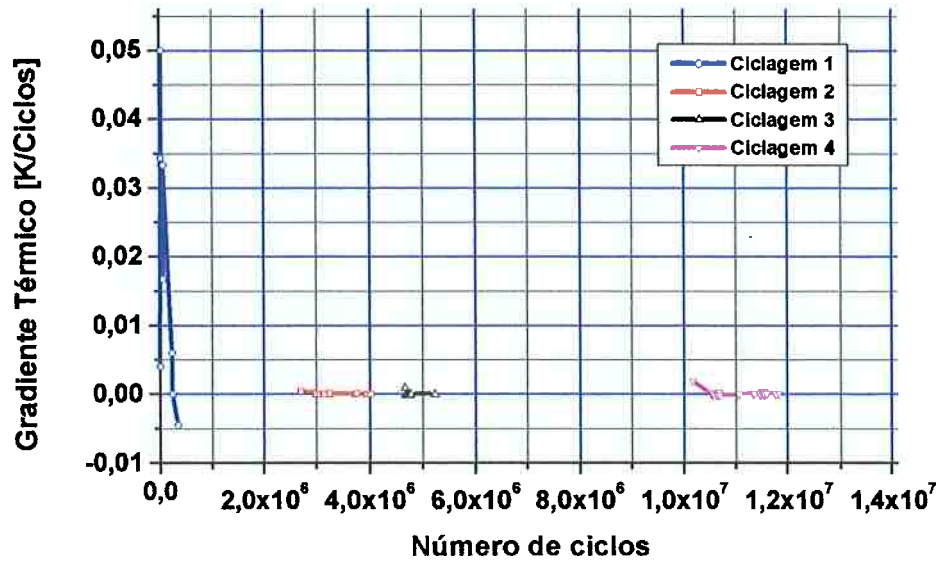


Figura 375. Evolução da carga normal de contato e velocidade durante o ensaio ER81 dos discos de Aço AISI 52100 SBQT (motor) e AISI 52100 OQT (movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO

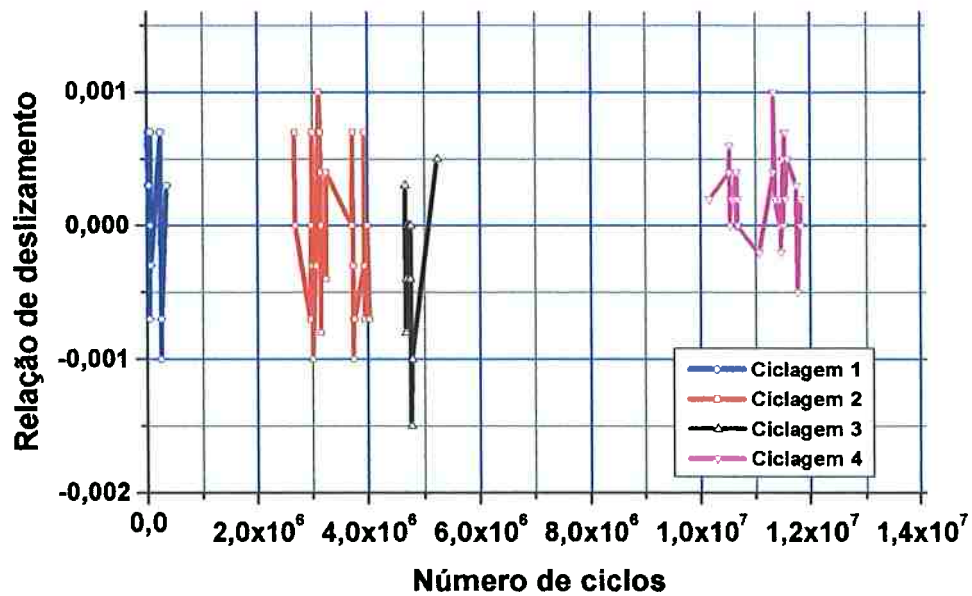
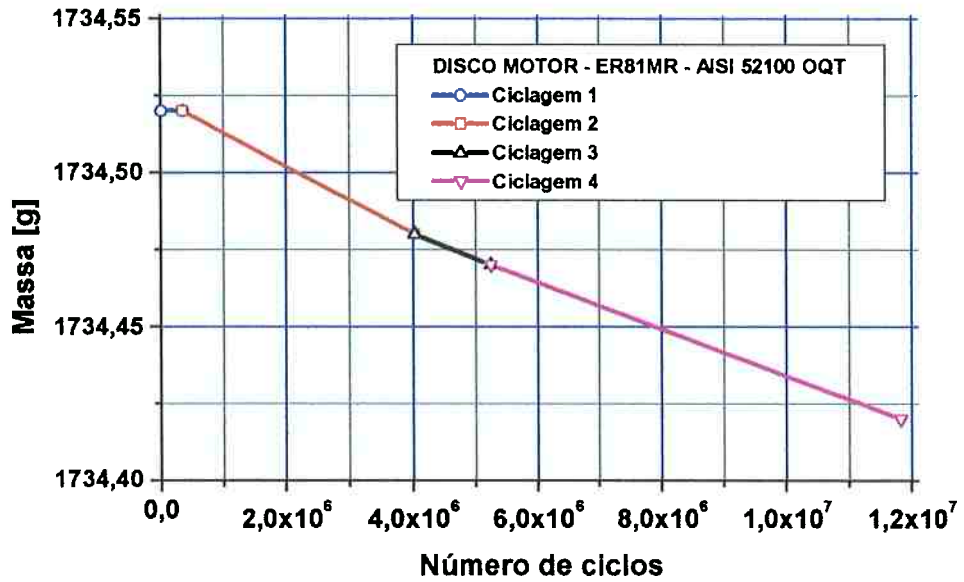


Figura 376. Gradiente de temperatura por ciclo e relação de deslizamento durante o ensaio ER81 dos discos de Aço AISI 52100 SBQT (motor) e AISI 52100 OQT (movido)

ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO



ENSAIO TRIBOLÓGICO DISCO-DISCO AÇO-AÇO

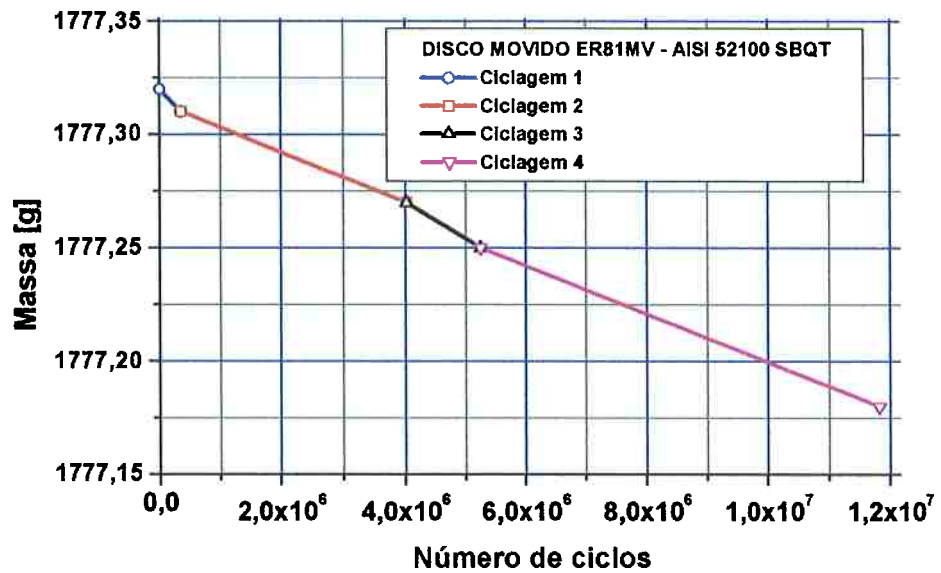


Figura 377. Evolução da perda de massa dos discos motor e movido durante o ensaio ER81 dos discos de Aço AISI 52100 SBQT (motor) e AISI 52100 OQT (movido)



Figura 378. Estado das pistas de contato durante o ensaio ER81 dos discos de Aço AISI 52100 OQT (movido), após 11,90 Megaciclos, verificando-se que as trilhas já nuclearam o mecanismo de *corrugação* ou *poligonização*, constatado pela presença intercalada de filmes de óxido mais escuros e mais claros



Figura 379. Estado das pistas de contato durante o ensaio ER81 dos discos de Aço AISI 52100 SBQT (motor) após 11,90 Megaciclos,

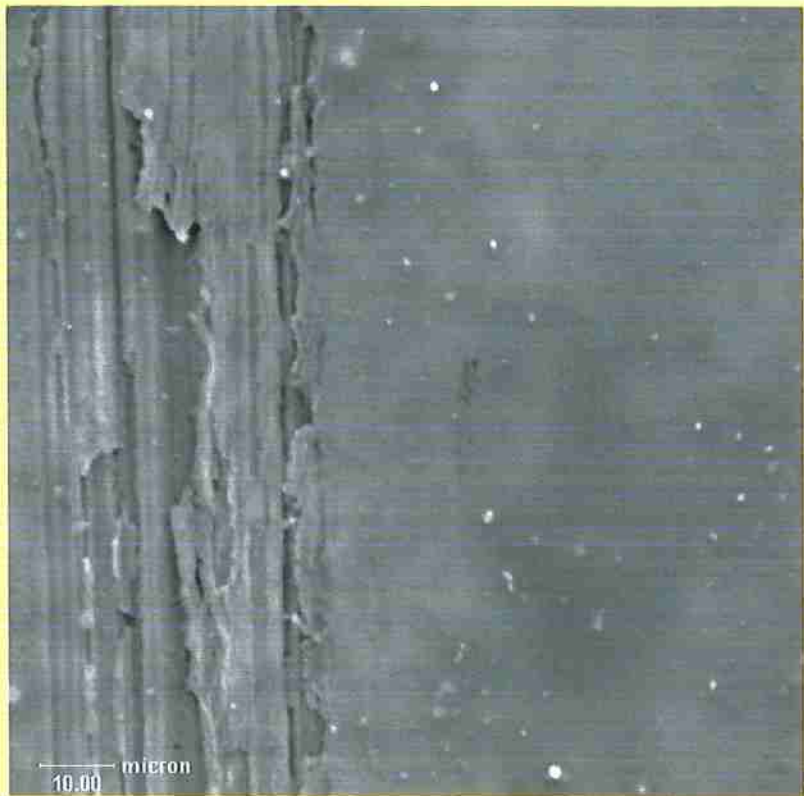


Figura 380. Desgaste moderado na pista de rolamento do disco movido (Aço AISI 52100 OQT), após 11,90 Megaciclos, ao fim do ensaio ER81

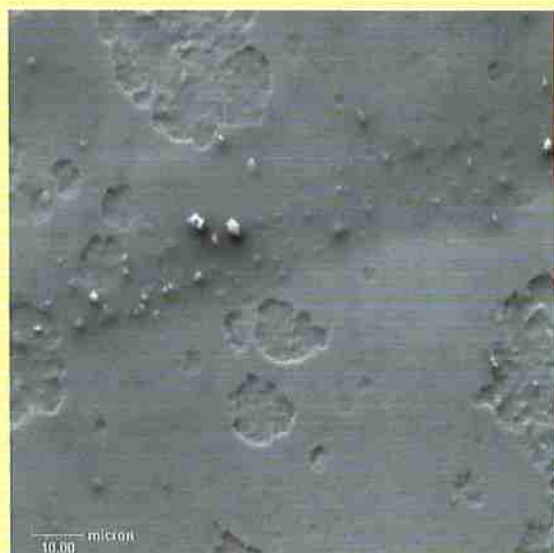


Figura 381. Evidências de danos superficiais durante o ensaio ER81, após 11,90 Megaciclos, e malhas de trincas térmicas na borda da pista de rolamento do disco movido (Aço AISI 52100 OQT)

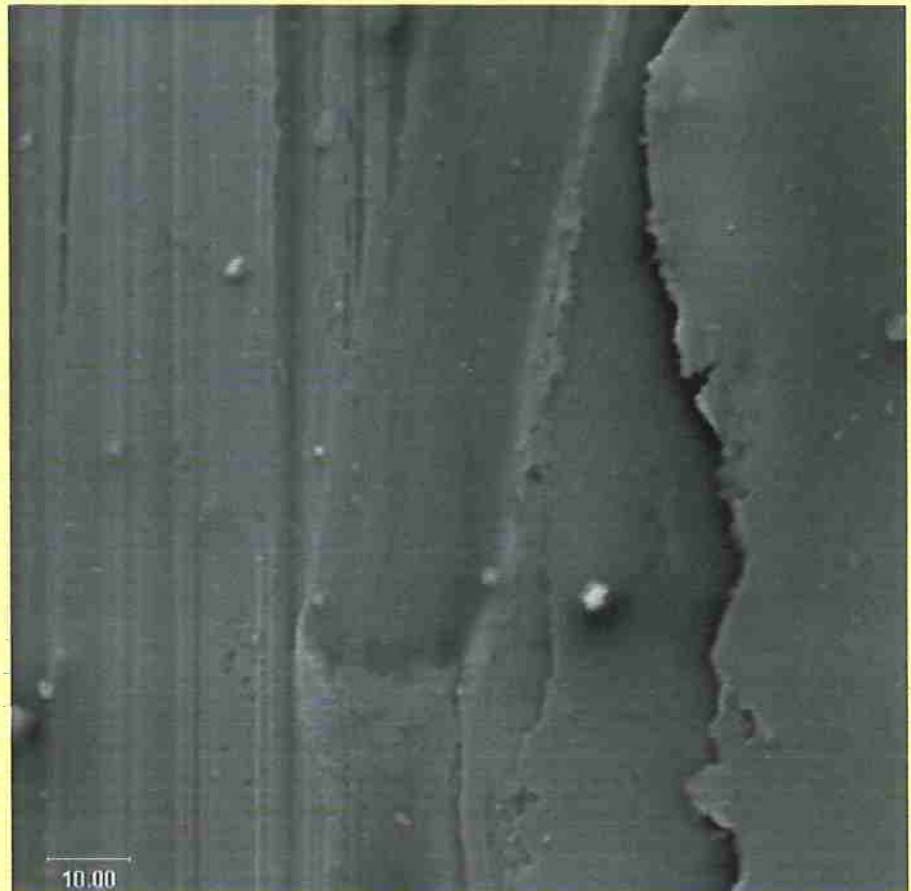


Figura 382. Formação de proa na expulsão por deslizamento de cavaco da pista do disco motor, após o ensaio ER81, 11,90 Megaciclos, 2,77 GPa, (Aço AISI 52100 SBQT)

Figura 383. Desgaste moderado devido ao contato de rolamento durante o ensaio ER81 do disco motor de Aço AISI 52100 SBQT, após 11,90 Megaciclos



**INTERFACE PISTA-BORDA DA
PISTA DE ROLAMENTO**

Anexo E

Contato de Hertz

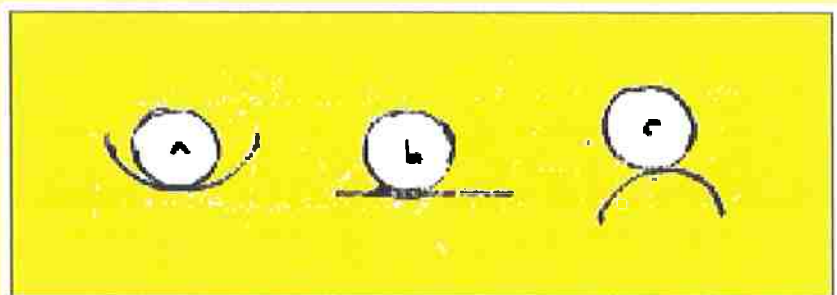
“Os homens fazem, eles próprios, sua história, mas num dado meio que os condiciona.”
Carta de Engels a Marx, século XIX

Da VINCI [séc. XV-XVI], que explorou como ninguém a expressão icônica para representar as suas idéias, apresentou a sua concepção de contato mecânico, exposta na Figura 384, em que define contato em função da sua osculação, definição geométrica para a interseção entre dois corpos sólidos.

Com base em seu modelo icônico e nos estudos de HERTZ [1881-2], define-se:

Contato de Hertz entre dois corpos sólidos é aquele em que suas superfícies, ditas em contato não conforme, são submetidas a um estado de tensão compressiva e se comportam elasticamente, com pequena osculação.

Figura 384.
Osculação do
contato, na
definição de
Da VINCI



- (a) Contato conforme;
- (b) Limiar entre os contatos conforme e não conforme;
- (c) Contato não conforme.

O estudo Hertziano de sólidos elásticos lineares é confinado às superfícies de contato sem atrito, Figura 385. Passados mais de cem anos, as deduções e conclusões de Hertz continuam atuais e fundamentam, *no regime elástico*, teorias da mecânica do contato, desde então.

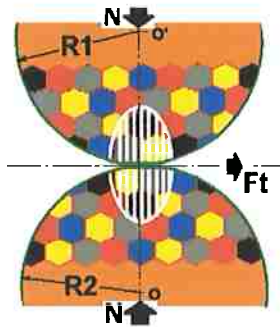


Figura 385. Zona de contato de Hertz: sem atrito, uma carga estática normal, N , ao comprimir dois sólidos, gera um *potencial de campo de pressão*, cuja distribuição é parabólica. Os estados *elásticos* de tensão e deformação afetam o espaço euclidiano definido pelo *potencial de campo*, os quais atingem o seu máximo, no centro de cada corpo. Sua hipótese de condições estáticas e sem atrito tornam a carga $F_t = 0$. Sob rolamento, porém, F_t é não nula.

Para Hertz, a pressão p entre dois corpos sólidos em contato, 1 e 2, distribui-se no âmbito de uma área de contato infinitamente pequena, $dx \cdot dy$. Assim, em um contato de Hertz, a força normal N aplicada a dois corpos é

$$N = \iint p \cdot dx \cdot dy \quad [E.1]$$

e, particularizando ao caso de duas esferas, com raios R_1 e R_2 , módulos de elasticidade E_1 e E_2 , e coeficientes de Poisson ν_1 e ν_2 , tem-se:

$$N = \frac{2}{3} \pi \cdot a^2 \cdot p_{\text{máx}} \quad [E.2]$$

onde a = raio do círculo de contato (rastros, “*footprint*” [ing.]) com área $A_{cc} = \pi \cdot a^2$ entre as esferas solicitadas por uma carga normal N .

Assim, definindo-se uma pressão média $p_{\text{méd}} = N/\pi \cdot a^2$, e substituindo-se a carga normal na [Eq. E.2], tem-se que

$$p_{\text{máx}} = 1,5 \cdot p_{\text{méd}} \quad [E.3]$$

Se os corpos não forem esféricos, mas superfícies circunferenciais com raios R_{1x} e R_{1y} nas direções ortogonais, o *raio equivalente* R é dado por

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{1}{R_{1x}} + \frac{1}{R_{1y}} \right) + \left(\frac{1}{R_{2x}} + \frac{1}{R_{2y}} \right) \right] \quad [E.4]$$

Hertz considerou constantes as propriedades elásticas de cada material; definindo-se os *parâmetros elásticos* m_i do contato (m_1 e m_2), $m_i = \frac{1 - \nu_i^2}{E_i}$ [E.5]

No livro clássico de resistência dos materiais, de Timoshenko e Goodier, consta a dedução completa do campo de tensões em um contato de Hertz. A partir dele, tem-se que o raio do contato a entre os dois sólidos 1 e 2 pode ser dado por:

$$a = \left(\frac{\pi}{4} \right) \left(1,5 \cdot \frac{N}{\pi \cdot a^2} \right) [(m_1 + m_2) \cdot R] \quad [\text{E.6}]$$

$$a = \sqrt[3]{\frac{3}{8} \cdot N \cdot [(m_1 + m_2) \cdot R]} = \sqrt[3]{\frac{3}{8} \cdot N \cdot \left[\left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right) \cdot R \right]} \quad [\text{E.7}]$$

e as tensões normais, máximas na superfície de contato entre os dois sólidos, são

$$\sigma_{z_{\text{máx}}} = -p_{\text{máx}} \quad [\text{E.8}]$$

$$\sigma_{x_{\text{máx}}} = \sigma_{y_{\text{máx}}} = -p_{\text{máx}} \cdot \left(\frac{1 + 2 \cdot \nu_i}{2} \right) \quad [\text{E.9}]$$

gerando a tensão de cisalhamento τ , máxima, na subsuperfície $z_0 = a \cdot \sqrt{[(1 + \nu)/(3,5 - \nu)]}$

$$\tau_{\text{máx}} = \left(\frac{p_{\text{máx}}}{2} \right) \left\{ \left[\frac{(1 - 2 \cdot \nu_i)}{2} \right] + \left[\frac{2 \cdot (1 + \nu_i) \cdot \sqrt{[2 \cdot (1 + \nu_i)]}}{9} \right] \right\} \quad [\text{E.10}]$$

Portanto, na solução obtida por Hertz, as tensões e as deformações na região de contato são uma função da *carga normal*, da *geometria* e das *propriedades elásticas dos materiais* dos corpos 1 e 2, cujas pistas têm raios (R_{1x} , R_{1y}) e (R_{2x} , R_{2y}). E a pressão máxima de Hertz para duas superfícies em contato não conforme pode ser dada, com erro estimado em $\pm 0,01$ GPa, pela expressão

$$p_{o_{\text{máx}}} = \frac{11}{12} \cdot \frac{N^{1/3}}{[(m_1 + m_2) \cdot R]^{2/3}} \quad [\text{Pa}] \quad [\text{E.11}]$$

onde N é a carga normal [Newton] e as variáveis pertinentes à condição geométrica do contato, R [metro] e elástica m_i [(Pascal) $^{-1}$ = (N/m 2) $^{-1}$] são definidas matematicamente

pelas equações [E.4] e [E.5], respectivamente. No caso em que uma das pistas é plana, Figura 1(b), ($R_{2x} = R_{2y} = \infty$) e para contatos conformes, Figura 1(a), os raios R_{2x} e R_{2y} devem ser considerados matematicamente negativos.

BORESI, SCHIMIDT, SIDEBOTTOM [1993] JOHNSON [1989] e KALKER [1990] apresentam uma abordagem mais detalhada do contato entre dois sólidos, embora não isenta de erros, dados os problemas locais decorrentes das *heterogeneidades do material* e do seu comportamento à temperatura *flutuante* do contato, já comentado no texto deste trabalho.

Bibliografia

ABRAHAM, F.F.; BRODBECK, D.; RUDGE, W.E.; XU, X. A Molecular Dynamics Investigation of Rapid Fracture Mechanics. *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, v. 45 (9), p. 1595-619, 1997.

ABRÃO, B.S. *História da Filosofia*. São Paulo: Editora Nova Cultural Ltda, 1999. 480p.

AKAMATSU, Y. Surface Profile of Rolling Bearings and Lubrication Theory. *Japanese Journal of Tribology*, v. 42 (12), p. 1339-48, 1997.

AKBASOGLU, F.C.; EDMONDS, D.V. Rolling Contact Fatigue and Fatigue Crack Propagation in 1C-1.5Cr Bearing Steel in the Bainitic Condition. *Metallurgical Transactions A*, v. 21A, p. 889-93, Apr. 1990.

ALMEIDA da SILVA, A. *Detecção e Análise Dinâmica de Falhas em Rolamentos*. 1998. 209p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos.

ALVES JR. C. *Nitretação a Plasma* - Fundamentos e Aplicações. Natal: Editora da UFRN, 2001. 122p.

AMERICAN SOCIETY FOR METALS. Metallography and Microstructures. In: *Metals Handbook*, manuals. 9. Ed. Ohio: v. 9, 1986. 775p.

AMONTONS (1699) *apud* HUTCHINGS, I.M. Friction. In: *Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials*. London: Edward Arnold, 1992-a. 22-57.

ANDRADE, F.A.; ESAT, I.I.; BADI, M.N.M. Gear condition monitoring by a new application of the Kolmogorov-Smirnov test. *Proc.of Inst. Mech. Engrs.*, v. 215 (part C), p. 653-61, 2001.

ARCHARD, J.F. Contact and Rubbing of Flat Surfaces. *Journal of Applied Physics*, v. 24 (8), p. 981-8, Aug. 1953.

BENTALL, R.H. ; JOHNSON, K.L. Slip in the rolling contact of two dissimilar elastic rollers. *International Journal of Mechanical Sciences*, v. 9, p. 389-404, 1967.

BET, L. *Estudo da Medição da Textura de Superfícies com Sondas Mecânicas e com Sondas Ópticas Tipo Seguidor*. 1999. 243p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina. Santa Catarina.

BEYNON, J.H.; GARNHAM, J.E.; SAWLEY, K.J. Rolling Contact Fatigue of Three Pearlitic Rail Steels. *Wear*, v. 192, p. 94-111, 1996.

BIGNONNET, A.; MERRIEN, P. Avant-propos. Actes des 17èmes Journées de Printemps, Société Française de Métallurgie et de Matériaux, (SFMM), Fatigue de Contact. Senlis-France, 1998.

BORESI, A.P.; SCHMIDT, R.J.; SIDEBOTTOM, O.M. *Advanced Mechanics of Materials*. New York: John Wiley & Sons, 1993. 811 p.

BOWER, A.F. The Influence of Crack Face Friction and Trapped Fluid on Surface Initiated Rolling Contact Fatigue Cracks. *Journal of Tribology*, v. 110, p. 704-11, Oct. 1988.

BRISCOE, B.J. Isolated contact stress deformations of polymers: the basis for interpreting polymer tribology. *Tribology Internacional*, v. 31, (1-3), p. 121-6, 1998.

BUCKINGHAM, E. *Analytical Mechanics of Gears*. New York: Dover Publications, 1988. 546p.

CHENG, W.; CHENG, H.S.; MURA, T.; KEER, L.M. Micromechanics Modeling of Crack Initiation Under Contact Fatigue. *Journal of Tribology*, v. 116, p. 2-8, Jan. 1994.

CLAYTON, P.; HILL, D.N. Rolling Contact Fatigue of a Rail Steel. *Wear*, v. 117, p. 319-34, 1987.

CLAYTON, P.; SU, X. Surface initiated fatigue of pearlitic and bainitic steels under water lubricated rolling/sliding contact. *Wear*, v. 200, p. 63-73, 1996.

DAMPIER, W.C. *Storia della Scienza*. Torino: Edizioni Scientifiche Einaudi, 1953. 750p.

DANG VAN, K.; MAITOURNAM, H.M. Modelisation des endommagements de contact. 17^e Journées de Printemps: Fatigue de Contact. Senlis - France, 27-28 mai 1998. Commission de Fatigue des Matériaux, *SFMM* - Société Française du Métallurgie et Materials.1(1) -1(9), 1998.

DARQUE-CERETTI, E. L'adhésion: les concepts et les causes. *La Revue de Métallurgie-CIT/Science et Génie des Matériaux*, p. 617-33, Mai 1997.

Da VINCI, L. *I Libri di Meccanica*. Milano: Editore Ulrico Hoepli, 1940. 673p.

DMITRIEV, A.I.; KOROSTELEV, S.Y.; OSTERMEIER, G.P.; PSAKHIE, S.G.; SMOLIN, A.Y.; SHILKO, E.V. Method of Movable Cellular Automata as a Tool for Modeling on the Mesolevel. *Mechanics of Solids*, v. 34 (6), p.73-9, 1999.

DOEBELIN, E.O. *Measurement Systems - Application and Design*. Tokyo: Mcgraw-Hill Kogakusha, LTD., 1976. 772p.

DRUDAGNE, G. L'evolution Cachee des Performances des Rolaments. Actes des 17èmes Journées de Printemps, *Société Française de Métallurgie et de Matériaux*, (SFMM), Fatigue de Contact. Paris-France:1998, p. 23(1)-23(16).

DUMONT, M.L. *Etude des endommagements de surface induits par la fatigue de roulement dans les contacts élastohydrodynamiques pour des aciers M50 et 100Cr6*. 1997. 197p. PhD Thesis. Laboratoire de Mécanique des Contacts, INSA de Lyon, France.

ELDREDGE, K.R.; TABOR, D. The mechanism of rolling friction: I. The plastic range. *Proceedings of the Royal Society London*, Series A, v. 229, p. 181-98, 1955-a.

ELDREDGE, K.R.; TABOR, D. The mechanism of rolling friction: II. The elastic range. *Proceedings of the Royal Society London*, Series A, v. 229, p. 198-220, 1955-b.

FLASKER, J.; FAJDIGA, G.; GLODEZ, S.; HELLEN, T.K. Numerical Simulation of Surface Pitting due to Contact Loading. *International Journal of Fatigue*, v. 23, p. 599-605, 2001.

FLODIN, A.; ANDERSSON, S. Simulation of mild wear in spur gears. *Wear*, v. 207, p. 16-23, 1997.

GLODEZ, S.; REN, Z.; FLASKER, J. Surface fatigue of gear teeth flanks. *Computers and Structures*, v. 73, p. 475-83, 1999.

GOSHIMA, T.; ISHIHARA, S.; SHIMIZU, M.; SODA, T. Mutual Interference of Two Subsurface Cracks in a Semi-Infinite Body due to Rolling Contact with Frictional Heating. *JSME International Journal*, Series A, v. 44 (4), p. 542-5, 2001.

- GRAS, R.; INGLEBERT, G. Fatigue de Contact: Endommagements et Simulation. 17^e Journées de Printemps: Fatigue de Contact. Senlis - France, 27-28 mai 1998. Commission de Fatigue des Matériaux, *SFMM - Société Française du Métallurgie et Materials*. 8(1)-8(12), 1998.
- GREENWOOD, J.A.; MINSHALL, H.; TABOR, D. Hysteresis losses in rolling and sliding friction. *Proceedings of the Royal Society London*, Series A, v. 259, p. 480-507, 1961.
- HADDAD, R. A.; PARSONS, T.W. *Digital Signal Processing Theory – Applications and Hardware*. New York: Computer Science Press, 1991. p. 136-401.
- HALLING, J. *Principles of Tribology*. Hong Kong: The MacMillan Press LTD, 1983. 401p.
- HAMILTON, G.M.; GOODMAN, L.E. The Stress Field Created by a Circular Sliding Contact. *Journal of Applied Mechanics*, p. 371-6, June 1966.
- HAMROCK, B.J. *Fundamentals of fluid film lubrication*. Singapore: McGraw Hill International Editions, 1994. 690p.
- HATATE, M.; SHIOTA, T.; TAKAHASHI, N.; SHIMIZU, K. Influences of graphite shapes on wear characteristics of austempered cast iron. *Wear*, v. 251, p. 885-9, 2001.
- HERNANDEZ, C.R.F.; MEDEIROS, J.T.N.; ORDOÑEZ, F.U.H; OLIVEIRA, A.M.; SINATORA, A.; TANAKA, D.K. Rolling Contact Fatigue Wear of Nitriding Austempered Ductile Iron (ADI)-ADI Discs. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 16, Uberlândia, nov. 2001. *COBEM'2001*. Uberlândia: ABCM, 2001. TRB 0834. 1 CD-ROM.
- HERTZ, H. Über die Berührung fester elastische Körper (On the contact of elastic solids). *J. reine und angewandte Mathematik*, 92, 1882, p. 156-71.
- HERTZBERG, R.W. *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials*. 4a. Ed., John Wiley & Sons Inc., New York, 1996, 786P.
- HIRATSUKA, K. Fractal Characteristics of Wear Particles. *Japanese Journal of Tribology*, v. 40 (7), p. 617-24, 1995.
- HOLMBERG, K.; MATTHEWS, A.; RONKAINEN, H. Coatings Tribology-Contact Mechanisms and Surface Design. *Tribology International*, v. 31 (1-3), p.107-20, 1998.

HOWE, M.S. Scattering of Bending Waves by Open and Closed Cracks and Joints in a Fluid-Loaded Elastic Plate. *Proceedings of the Royal Society London, Series A*, v. 444, p. 555-71, 1994.

HUTCHINGS, I.M. *Tribology* - Friction and Wear of Engineering Materials. Cambridge: British Library Cataloguing in Publication Data, 1992-a. 273p.

HUTCHINGS, I.M. Ductile-brittle Transitions and Wear Maps for the Erosion and Abrasion of Brittle Materials. *Journal of Physics D: Applied Physics.*, v. 25, p. A 212-A 221, 1992-b.

JACQ, C.; NÉLIAS, D.; LORMAND, G.; GIRODIN, D. Development Of a Three-Dimensional Semi-Analytical Elastic-Plastic Contact Code. *ASME Journal of Tribology*, v. 124 (4), p. 1-15, October 2002.

JOHNSON, K. L. *Contact Mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1989. 452p.

JOHNSON, K. L. Adhesion and Friction between a Smooth Elastic Spherical Asperity and a Plane Surface. *Proceeding of the Royal Society London, Series A*, v. 453, p. 163-79, 1997.

KALKER, J.J. The rolling contact problem. In: *Three-Dimensional Elastic Bodies in Rolling Contact*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1990. p. 1-45

KALKER, J.J.; PÉRIARD, F. Wheel-rail noise: impact, random, corrugation and tonal noise. *Wear*, v. 191, p. 184-7, 1996.

KURTZE, G. *Física y técnica de la lucha contra el ruido*. Bilbao: Ediciones URMO, 1969. p. 41-113.

LAZAN, B.J. Effect of Damping Constants and Stress Distribution on the Resonance Response of Members. *Journal of Applied Mechanics*, p 201-9, June 1959.

LIM, S.C. Recent Development in Wear-Mechanism Maps. *Tribology International*, v. 31 (1-3), p. 87-97, 1998.

LITTMANN, W.E.; WIDNER, R.L. Propagation of Contact Fatigue from Surface and Subsurface Origins. *ASME Journal of Basic Engineering*, v. 88, p. 624 – 36, 1966.

LUZZI, R. *Tópicos em Termodinâmica Estatística de Processos Dissipativos* -Teoria da Função-Resposta. Campinas: Editora da Unicamp, 2000. 163p.

MAN, K.W.; ALIABADI, M.H.; ROOKE, D.P. BEM Frictional Contact Analysis: An Incremental Loading technique. *Computers and Structures*, v. 47, p. 893-905, 1993.

- McCLINTOCK, F.A. The mechanics of elastic-plastic fracture. In: _____; ARGON, A. A. *Mechanical Behavior of Materials*. Reading, MA: Addison-Wesley Publishing Inc, p. 534-40, 1966.
- MEDEIROS, J.T.N.; TANAKA, D.K.; SINATORA, A. Um estudo experimental da fadiga de contato de rolamento em discos de aço AISI 52100 (DIN 100Cr6) temperados em banho de sais e em óleo e revenidos. In: JORNADAS PORTUGUESAS DE TRIBOLOGIA, 7., Porto, 2000. *Anais*. Porto: ISEP, jun. 2000-a. p. 109-12.
- MEDEIROS, J.T.N.; SINATORA, A.; TANAKA, D.K. Tensões térmicas cíclicas em aço AISI 52100 aquecido por chama GLP. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, Natal, 2000. *CONEM'2000*. Natal: ABCM, ago. 2000-b. p. 4046-54. 1 CD-ROM.
- MEDEIROS, J.T.N.; SINATORA, A.; TANAKA, D.K. Mecanismos de Fadiga de Contato em Discos de Aço AISI 52100. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, Natal, 2000. *CONEM'2000*. Natal: ABCM, ago. 2000-c. p. 4046-54. 1 CD-ROM.
- MEDEIROS, J.T.N.; MARTINEZ, L.G.; SOUZA, R.M.; TANAKA, D.K. A New Method for the Evaluation of Wear Damage in Dry Rolling Contact by Sound Intensity Level and Residual Stresses Measurements. *Materials Science Forum*, v. 404-407, p. 773-6, 2002-a.
- MEDEIROS, J.T.N.; SINATORA, A.; TANAKA, D.K. Audible Noise Contact Temperature, Life and Microfracture of Dry Rolling Surfaces using DIN 100Cr Steel. *Key Engineering Materials*, v. 230-232, p. 471-4, 2002-b.
- MEDEIROS, J.T.N.; MARTINEZ, L.G.; SOUZA, R.M.; TANAKA, D.K. Evolução de Tensões Residuais em Discos Desgastados por Rolamento Cíclico Não Lubrificado. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, João Pessoa, ago. 2002-c. *CONEM 2002*.
- MORETTIN, P.A. *Ondas e Ondaletas - Da Análise de Fourier à Análise de Ondaletas*. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1999. 272p.
- MORIN, E. *La Méthode - La Nature de la Nature*. Paris: Éditions du Seuil, 1977. 399p.
- MUMMERY, L. *Surface Texture Analysis the Handbook*. Mühlhausen: Hommelwerke GmbH, 1992. 106p.
- MURAV'EV, V.A. Damping of Sonic Vibrations in Metals. *Metal Science and Heat Treatment*, v.17, p. 342-3, 1975.

- MYSHKIN, N.K.; PETROKOVETS, M.I.; CHIZHIK, S.A. Simulation of real contact in tribology. *Tribology International*, v. 31, n. 1-3, p. 79-86, 1998.
- NAKANO, T. Toward the Coherent Development of Tribology na Mathematical Science. *Japanese Journal of Tribology*, v. 40 (7), p. 171-9, 1995.
- NEALE, M.J. *The Tribology Handbook*. 2. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1997.
- NÉLIAS, D. *Etude du Glissement dans les Roulements a Billes grande Vitesse de Turbomachine - Influence de la Pollution du Lubrifiant*. 1989. 292p. These (Docteur) – L'Institut National des Sciences Appliquees de Lyon. Lyon.
- NÉLIAS, D.; DUMONT, M.-L.; COUHIER, F.; DUDRAGNE, G.; FLAMAND, L. Experimental and Theoretical Investigation on Rolling Contact Fatigue of 52100 and M50 Steels Under EHL or Micro-EHL Conditions. *ASME Journal of Tribology*, v. 120, n. 2, Apr. 1997
- NÉLIAS, D.; DUMONT, M.L.; COUHIER, F.; DUDRAGNE, G.; FLAMAND, L. Experimental and Theoretical Investigation on Rolling Contact Fatigue of 52100 and M50 Steels Under EHL or Micro-EHL Conditions. *Journal of Tribology*, v. 120, p. 184-90, 1998-a.
- NÉLIAS, D., DUMONT, M.L., CHAMPIOT, F., VINCENT, A., GIRODIN, D., LORMAND, G., FOUGERES, R., FLAMAND, L. Influence des Inclusions de L'état de Surface et des Conditons de Fonctionnement sur la Fatigue des Acieres M50 et 100Cr6 dans les Contacts Pontuels Lubrifiés. *SFMM 17e Journées de Printemps: Fatigue de Contact*. *Senlis-France*, v. 10 (1)-10 (12), 1998-b.
- NORTON, R.L. *Machine Design*. New Jersey: Prentice-Hall, 1996. 1048p.
- OLIVEIRA, A.M.; MEDEIROS, J.T.N.; TANAKA, D.K.; SINATORA, A.; GOLDENSTEIN, H.; CUMINO, R.S.; SILVA, W.G. The Scuffing Resistance of the Nitrocarburized and Carburize Steel. In: *CONGRESSO SAE BRASIL 2000*, São Paulo, out 2000. SAE Technical Paper Series 2000-01-3258 E.
- OPPENHEIM, A.V.; WILLSKY, A.S.; YOUNG, I.T. *Signals and Systems*. New Jersey: Prentice-Hall Inc., 1983. 796p.
- ORDOÑEZ, F.U.H. Microestruturas de ferro fundido nodular austemperado. Comunicação verbal, 1998.
- PELLOUX, R.M.; GENKIN, J.M. Fatigue-Corrosion. In: BATHIAS, C.; BAILON, J.-P. *La Fatigue des Matériaux et des Structures*. 2.ed. Paris: Hermes, 1997. p. 365-86.

- PIOT, D.; LORMAND, G.; VICENT, A.; FOUGÈRES, R.; BAUDRY, G.; GIRODIN, D.; DUDRAGNE, G. Prevision de la Distribution des Durees de Vie em Fatigue de Roulement a partir des Caracteristiques Inclusionaires de L'acier. Actes des 17èmes Journées de Printemps, *Société Française de Métallurgie et de Matériaux*, (SFMM), Fatigue de Contact. Paris-France:1998, p. 3(1)-3(12).
- POLLOCK, A.A. Acoustic Emission Inspection. *ASM Handbook: Tribology*, Materials Park, v. 19, p. 278-94, 1996.
- PRIGOGINE, I.; KONDEPUDI, D. *Termodinâmica dos Motores Térmicos às Estruturas Dissipativas*. Éditions Odile Jacob - Instituto Piaget, Coleção Ciência e Técnica, Lisboa, 1999. 418p.
- PRONIKOV, A.S. Calculation of tribological Joints for Wear. In: KRAGELSKY, I.V.; ALISIN, V.V. [1981] Friction, Wear, Lubrication- *Tribology Handbook*. Moscow, Editorial Mir. Volume 1. 384 p.
- RETI, L. Elementi di macchine. In: _____. (ed.) *Leonardo*. Milan, 1974. p. 264-87.
- REYNOLDS, O. On Rolling-Frictions. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, Serie A, v. 166, p. 155-74, 1875.
- ROBERGE, P.R. An object oriented model of material failures. *Computers in Industry*, v. 31 (1), p. 85-93, 1996.
- SAINSHOT, P.; JACQ, C.; NÉLIAS, D. A Numerical Model for Elastoplastic Rough Contact. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*. Preprint, july 2002. 10p.
- SANTANA da SILVA, W. Estudo da Tenacidade à Fratura do Aço Rápido M2 Fundido, Modificado e Tratado Termicamente. 2001. 152p. *Dissertação* (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo.
- SOMMERFELD, A.; BOPP, F.; MEIXNER, J. *Thermodynamics and Statistical Mechanics*. New York: Academic Press Inc., 3.ed., 1966. 401p.
- SPIKES, H.A. Wear in Rolling Contacts. *Wear*, v. 112, p. 121-44, 1986.
- STACHOWIAK, G.W. Numerical Characterization of Wear Particles Morphology and Angularity of Particles and Surfaces. *Tribology International*, v. 31., n. 1-3, p. 139-57, 1998.
- STEVENS, D. *Bearings Failures and their Causes*. Disponível em: <http://web.ukonline.co.uk/online.co.uk/d.stevens2/technical/contents.htm/>. Acesso em Jun. 2002.

- SUH, N.P. The Delamination Theory of Wear. *Wear*, v. 25, p. 111-24, 1973.
- SUH, N.; TURNER, A.P.L. *Elements of the Mechanical Behavior of Solids*. New York: McGraw-Hill Book Company, 1976. 615p.
- SURESH, S. Small Fatigue Cracks. In: _____ *Fatigue of Materials*. Cambridge: Cambridge University Press, 1996. p. 291-313.
- SZARGUT, J.; MORRIS, D.R.; STEWARD, F.R. *Exergy analysis of thermal, chemical, and metallurgical processes*. Berlin: Springer-Verlag, 1988. p. 8.
- TABOR, D. Mechanism of Boundary Lubrication. . *Proceedings of the Royal Society London*, Series A, v. 212, p. 498-505, 1952.
- TABOR, D. The mechanism of rolling friction: I. The elastic range. *Proceedings of the Royal Society London*, Series A, v. 229, p. 198-220, 1955.
- TABOR, D. Tribology and Phusics. *Journal Physics D: Applied Physics*, v. 25, p. A1-A2, 1992.
- TALLIAN, T.E. Simplified Contact Fatigue Life Prediction Model- Part I: Review of Published Models. *Journal of Tribology*, v. 114, p. 207-22, Apr. 1992.
- TERHECI, M.; MANORY, R.R.; HENSLER, J.H. The Friction and Wear of Automotive Grey Cast Iron Under Dry Sliding Conditions - Part I. Relationships between Wear Loss and Testing Parameters. *Wear*, v. 180, p. 73-8, 1995.
- TERHECI, M. Wear by Surface Fatigue on a New Foundation - Part II. Particle Detachment Mechanisms and Quantitative Aspects. *Wear*, v. 218, p. 191-202, 1998.
- TIMOSHENKO, S.; GOODIER, J.N. *Theory of elasticity*. New York: McGraw-Hill, 1951. p. 12-341.
- TRICOT, R. Influence des paramètres métallurgiques sur les phénomènes de fatigue de contact en roulement-glissements des roulements et engrenages. *Revue de Métallurgie*, p. 385-411, Avr. 1976.
- TZOU, J.-L.; SURESH, S.; RITCHIE, R.O. Fatigue Crack Propagation in Oil Environments - I. Crack Growth Behavior in Silicone and Paraffin Oils. *Acta Metallurgical*, v. 33 (1), p. 105-16, 1985.
- VAN VLACK, L.H. *Princípios de Ciência dos Materiais*. 11.ed. São Paulo: Editora Edgar Blücher Ltda, 1995. 427p.

- VOSKAMP, A.P. Material Response to Rolling Contact Loading. *ASME Trans., Journal of Tribology*, v. 107, p. 359-66, 1985.
- VOSKAMP, A.P.; MITTEMEIJER, E.J. Crystallographic Preferred Orientation Induced by Cyclic Rolling Contact Loading. *Metallurgical and Materials Transactions A*, v. 27A, p. 3445-65, Nov. 1996.
- VOSKAMP, A.P. Subsurface Residual Stress Concentrations during Rolling Contact Fatigue. *Materials Science Forum*, vols. 347-9, 2000.
- WAY, S. Pitting Due to Rolling Contact. *ASME Trans., Journal of Applied Mechanics*, v. 2, A49-A58, 1935.
- WEIBULL, W. A Statistical Distribution Function of Wide Applicability. *ASME Journal of Applied Mechanics*, p. 293-7, Sept. 1951.
- WEIBULL, W. Efficient Methods for Estimating Fatigue Life Distributions of Roller Bearings. In: BIDWELL, J.B. *Rolling Contact Phenomena*. Amsterdam - London - New York: Elsevier Publishing Company, 1962. p. 252-65.
- WHITEHOUSE, D.J. One-Body interactions. In: *Handbook of Surface Metrology*. Philadelphia: US Editorial Office, 1994. p. 861-72.
- WILLIAMS, J.A. *Engineering Tribology*. Oxford - New York - Tokyo: Oxford University Press, 1996. 488p.
- YOSHIOKA, T. Detection of Rolling Contact Subsurface Fatigue Cracks Using Acoustic Emission Technique. *Journal of Society of Tribologists and Lubrication Engineers*, v. 49 (4), p. 303-8, 1993.
- YOSHIOKA, T.; TAKEDA, M. Clarification of Rolling Contact Fatigue Initiation using Acoustic Emission Technique. *Journal of the Society of Tribologists and Lubrication Engineers*, v. 51 (1), p. 41-4, 1995.
- ZHANG, M.Q.; LU, Z.P.; FRIEDRICH, K. On the wear debris of polyetheretherketone: fractal dimensions in relation to wear mechanisms. *Tribology International*, v. 30(2), p. 87-102, 1997.