

# DETERMINAÇÃO AUTOMÁTICA DE CORRESPONDÊNCIA EM UM SISTEMA DE RECONSTRUÇÃO COM LUZ ESTRUTURADA

*Automatic target location in a reconstruction system by using structured light*

Patrícia Andréia Paiola Scalco  
Antonio Maria Garcia Tommaselli

Universidade Estadual Paulista – Unesp  
Faculdade de Ciências e Tecnologia  
Departamento de Cartografia  
Rua Roberto Simonsen, 305  
19.060-900 Presidente Prudente, S.P.  
patricia.scalco@ufrgs.br  
tomaseli@prudente.unesp.br

## RESUMO

Este trabalho descreve o método para a localização e rotulação automática de pontos projetados, usado no Sistema Fotogramétrico Digital para Reconstrução de Superfícies à Curta Distância denominado *3DSCAN*, que é constituído por uma câmara digital e um projetor de padrões. O sistema é baseado na técnica da luz estruturada e a cena, onde está presente o objeto a ser reconstruído, é iluminada por um projetor que gera uma grade de padrões. A imagem é capturada por uma câmara digital e transferida para o computador, onde é realizado o processamento. Neste trabalho é apresentada a solução para o problema de correspondência automática entre os padrões da grade original e a grade projetada na imagem. O centro dos pontos projetados é determinado usando-se um critério de centro de massa para calcular suas coordenadas. A imagem é varrida pixel a pixel e, ao ser encontrado um pixel colorido, o mesmo é rotulado e é obtido um centro inicial do alvo. O procedimento continua, até que todos os pixels pertencentes ao alvo sejam rotulados e o centro do mesmo seja obtido com precisão ao nível do sub-pixel. e até serem obtidos todos os pontos projetados da imagem. Em uma etapa posterior estes pontos são reconhecidos automaticamente usando um critério de rotulação por vizinhança com os atributos de cor e deflexão entre o ponto e sua vizinhança. De posse dos dados de calibração do projetor e da câmara, obtidos por um processo

anterior, e dos pontos correspondentes, são calculadas as coordenadas tridimensionais dos mesmos, sendo possível a reconstrução do modelo do objeto ou da superfície.

### ABSTRACT

This paper describes the automatic target location used in the Photogrammetric Close Range System for surface reconstruction. This system is based on a digital camera and a pattern projector. The scene is illuminated by the projector, that generates patterns. The image is captured by a digital camera and transferred to the computer, where some processing is to be accomplished. This processing should define the correspondence between the rays of the projected bundle and the points in the image. This system is based on the technique of structured light. The problem to be solved is the correspondence problem. The centre of the projected points are determined using an approach to compute the coordinates of the mass centre. The background is considered to be black and the projected points are coloured. A threshold value is computed using grey levels of the image. The image is scanned and once a target pixel is found it is assigned as the first pixel. The procedure continues, until all the pixels belonging to the target are labeled and the centre of the same is accurately computed and until all the projected points of the image were extracted. Labeled points are matched using some attributes, such as proximity, orientation and color. Using previously calibrated projector parameters surface reconstruction is performed.

## 1 INTRODUÇÃO

A automação em Fotogrametria se deve não somente aos esforços dos fotogrametristas, mas também à contribuição dos profissionais da área de Processamento Digital de Imagens, Visão Computacional e Computação.

Um sistema fotogramétrico digital de baixo custo, automático e com resposta em tempo real foi desenvolvido (Scalco e Tommaselli, 1997 e 2000; Tommaselli, 1998) sendo constituído por uma câmara digital e um projetor de padrões, baseado na técnica da luz estruturada.

Na literatura existem alguns trabalhos que utilizam o princípio da luz estruturada:

Guisser et al. (1992) descrevem um método de medição tridimensional usando uma grade projetada sobre a superfície que será reconstruída. As curvas distorcidas pela superfície do objeto permitem extrair informações acerca da mesma.

Dunn et al. (1989) recuperam a forma tridimensional de partes do corpo humano projetando uma grade sobre o objeto e a imagem é registrada usando uma única câmara. A grade padrão na imagem aparece distorcida devido à curvatura do objeto. As posições dos pontos são determinadas por triangulação.

Singh et al. (1997) usam padrões de luz estruturada na medida tridimensional de objetos sem textura.

Plassmann (1995) descreve um sistema usando luz estruturada para medida de feridas. Um instrumento foi desenvolvido e projeta uma sequência de faixas paralelas de luz sobre a superfície da ferida. Esses padrões são observados por uma câmara, a qual está conectada a um sistema computacional onde as imagens são armazenadas e processadas.

Maas (1992) usa luz estruturada para a medição de superfícies de objetos os quais não apresentam textura na superfície. Padrões são projetados sobre o objeto por um projetor de slides e a imagem capturada por duas ou mais câmaras. O estabelecimento de correspondência é realizado usando informações de linhas epipolares. Somente se a superfície for relativamente plana e se bons valores aproximados estiverem disponíveis, ou o número de pontos projetados é pequeno, o problema de correspondência pode ser solucionado com o sistema baseado em somente duas câmaras.

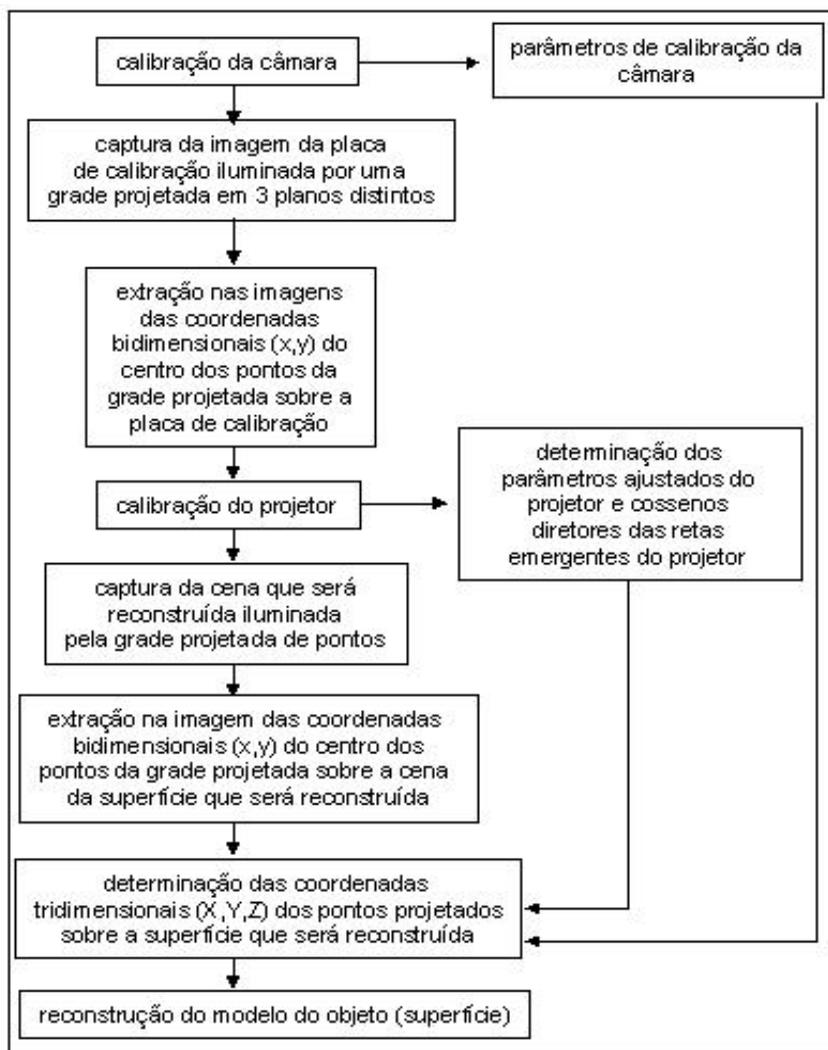
Zanini (1991) citado por Maas (1992) utilizou o método descrito acima combinado com triangulação por feixe de raios para gerar um modelo de superfície do busto de Beethoven.

Neste trabalho é descrita a solução encontrada para o problema de correspondência automática, que consiste em detectar a relação entre os pontos na imagem e seus homólogos no padrão projetado.

A figura 1 apresenta a sequência usada na reconstrução de superfícies a curta distância. Na primeira etapa, deve-se calibrar a câmara. De posse dos parâmetros de calibração da câmara, deve-se calibrar o projetor. Para que isso seja possível, deve-se capturar imagens da placa de calibração iluminada pela grade projetada de pontos em três planos distintos. Isto é realizado movendo-se o sistema 3DSCAN ou o plano de projeção.

Da calibração do projetor resultam os cossenos diretores das retas emergentes do projetor e os parâmetros ajustados da localização do centro perspectivo do projetor. A imagem da cena a ser reconstruída é capturada, também iluminada pela grade projetada de pontos. Uma extração automática de coordenadas bidimensionais do centro dos pontos projetados sobre a superfície é realizada. Tendo-se os parâmetros da câmara, projetor, cossenos diretores das retas emergentes do projetor e coordenadas bidimensionais  $(x,y)$  da cena a ser reconstruída, é possível determinar suas coordenadas tridimensionais.

Figura 1 - Sequência do processo de reconstrução de superfícies a curta distância.



O algoritmo de reconstrução baseia-se na intersecção das retas calculadas a partir de pontos homólogos na imagem e no projetor. O modelo matemático principal do sistema (Scalco e Tommaselli, 1997) é dado pelas equações (1.1) e (1.2):

$$x_i = -f \frac{X_o + \lambda_i l_i}{Z_o + \lambda_i n_i} \quad (1.1)$$

$$y_i = -f \frac{Y_o + \lambda_i m_i}{Z_o + \lambda_i n_i} \quad (1.2)$$

onde:

$(x_i, y_i)$  são coordenadas-imagem (no referencial fotogramétrico e refinadas) obtidas na etapa de determinação da correspondência;

$(X_o, Y_o, Z_o)$  são as coordenadas do centro perspectivo do projetor;

$(l_i, m_i, n_i)$  são e os cossenos diretores das retas emergentes do projetor;

$f$  é a distância focal da câmara;

$\lambda_i$  é a distância entre o centro perspectivo do projetor e o ponto.

Após serem determinadas as coordenadas tridimensionais da cena é possível visualizar o modelo tridimensional da cena através de qualquer software que importe as coordenadas do arquivo gerado da cena que contém as coordenadas tridimensionais  $(X, Y, Z)$ .

O reconhecimento e rotulação automática dos pontos projetados, etapa desenvolvida neste trabalho, é de fundamental importância para a resposta em tempo real do sistema.

## 2 LOCALIZAÇÃO AUTOMÁTICA DE PONTOS PROJETADOS

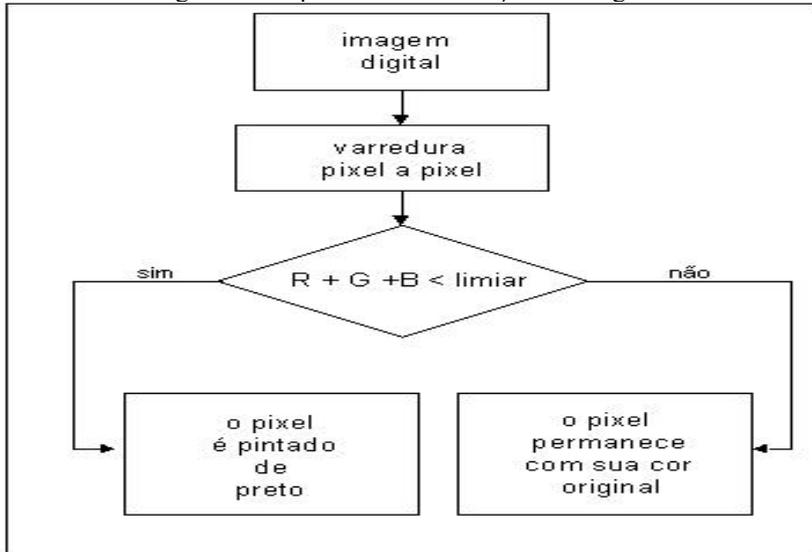
A localização automática dos pontos projetados torna-se fundamental para resolver o problema de correspondência entre os pontos na imagem e seus homólogos no padrão projetado. Uma localização manual, ou mesmo semi-automática é impraticável, pois em apenas um experimento realizado neste trabalho foram determinadas mais de 3500 coordenadas. Além disso, aumentaria muito o tempo de resposta do sistema e existe a possibilidade do operador cometer erros grosseiros.

Para a localização automática dos pontos projetados parte-se do princípio de que o fundo da imagem obtida com a câmara digital que integra o sistema é escuro e os pontos projetados são claros. Existem dois limiares envolvidos: o primeiro faz com que o fundo da imagem seja pintado de preto e o segundo limiar auxilia no processo de reconhecimento das cores dos alvos projetados.

O primeiro limiar, fornecido pelo usuário, transforma os pixels escuros do fundo da imagem em pretos e é fornecido pelo usuário. Foi constatado empiricamente que o valor do limiar é um valor pouco maior que a soma das componentes R, G e B de um ponto da placa de calibração. O usuário deve marcar com o *mouse* em qualquer ponto da imagem que esteja em torno da região onde estão os alvos projetados para treinar o sistema. Existem campos que são mostrados na tela do programa, nos quais o usuário pode ler os valores das componentes R, G e

B. Com isso ele pode somar os valores e atribuir o mesmo ao limiar e verificar se está adequado. A limiarização faz com que os pontos projetados tenham maior destaque na imagem e elimina os ruídos do fundo. Na figura 2 é mostrado um esquema do processo de limiarização da imagem.

Figura 2 - Esquema da limiarização da imagem.



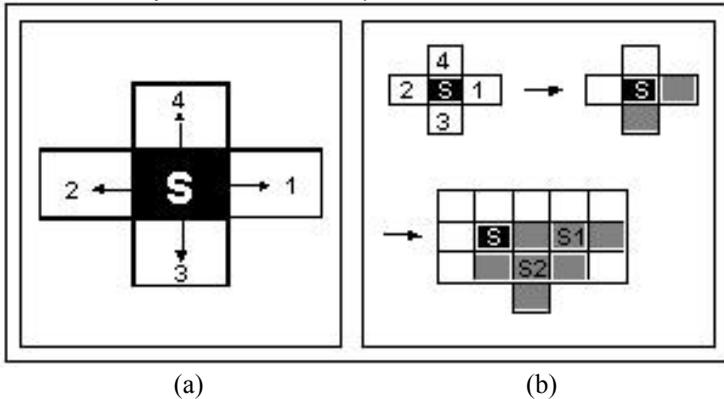
Após a imagem ter sido limiarizada, os pontos projetados estão prontos para serem extraídos. Para facilitar esta tarefa é estabelecida uma região de busca para estes pontos. Esta região é determinada pelo usuário ao marcar com o *mouse* quatro pontos em torno da região que contém os pontos projetados. Este procedimento é realizado para diminuir a região de busca e acelerar o processo. Além disso evita-se que pseudo alvos sejam determinados, caso a cena seja capturada com a placa de calibração ao fundo (onde existem os pontos de apoio que podem ser confundidos com alvos) ou alguma paisagem.

O segundo limiar está inserido na rotina de determinação automática das coordenadas do centro dos pontos projetados e serve para auxiliar no processo de reconhecimento das cores dos alvos. Seu valor foi estabelecido empiricamente de acordo com as cores usadas na projeção dos alvos.

A determinação automática do centro dos alvos é realizada da seguinte maneira: a imagem é varrida pixel a pixel, e, ao ser encontrado um pixel colorido ou branco, ou seja um pixel que atenda à uma condição pré-estabelecida, o mesmo é rotulado e denominado de pixel semente, tendo sua vizinhança 4 conectada verificada.

O pixel semente é estabelecido como o centro inicial do alvo e, após um processo de inundação, outros pixels são agrupados ao alvo e o centro é atualizado recursivamente até que suas coordenadas sejam estabelecidas, usando, além do processo de inundação, o critério de centro de massa. Na figura 3(a) é mostrado um exemplo de pixel semente (S) e sua vizinhança 4-conectada (nas direções 1-leste, 2-oeste, 3-sul e 4-norte). Na figura 3(b) é mostrado um pixel semente, sua vizinhança 4-conectada e uma representação do processo de inundação. Os pixels designados  $S_i$  ( $i=1,2,\text{etc}...$ ) são os novos pixel-semente.

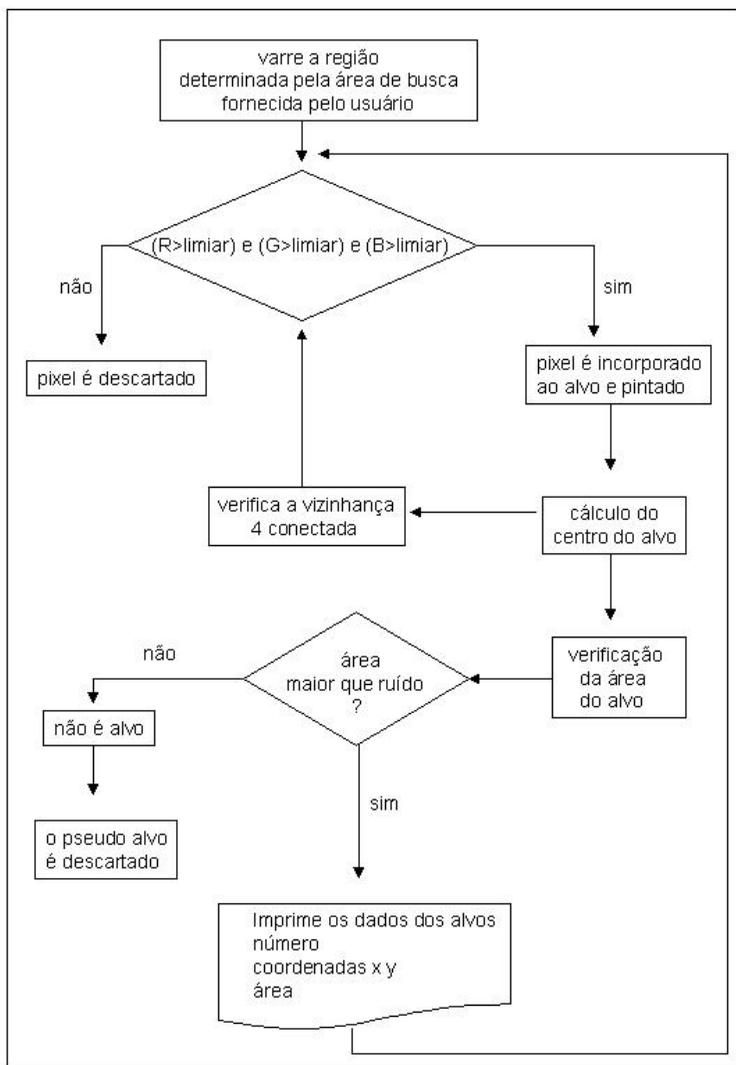
Figura 3 - Pixel semente, vizinhança 4 conectada e representação do processo de inundação.



Após calcular a coordenada do primeiro alvo, a imagem continua a ser varrida até encontrar um novo pixel com valor acima do limiar pré estabelecido. O procedimento é análogo ao descrito anteriormente e é repetido até que todas as coordenadas do centro de massa dos alvos da imagem sejam calculadas.

Além das coordenadas centrais dos pontos projetados ( $x$  e  $y$ ), é determinada a área dos mesmos. Verificou-se empiricamente que alvos cuja área seja menor que um determinado valor não são alvos e sim ruídos, ou seja manchas ou falhas na imagem. No caso dos experimentos realizados neste trabalho, o valor obtido para a área destes ruídos foi de 7 pixels. Após ser calculada a coordenada central de cada alvo, a área do mesmo é verificada e se o valor obtido for maior que o valor estabelecido como ruído o mesmo é classificado como alvo; caso contrário o mesmo é descartado. Na figura 4 é mostrado um esquema do procedimento para a localização automática de pontos projetados.

Figura 4 - Esquema da determinação automática do centro dos pontos projetados.



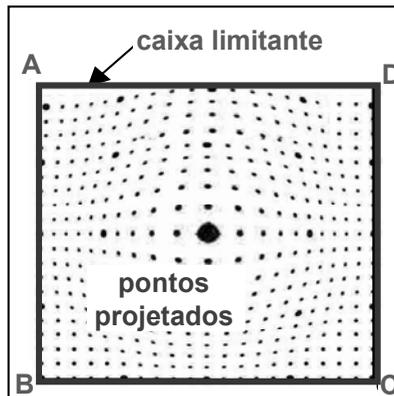
### 3 ROTULAÇÃO AUTOMÁTICA DE PONTOS PROJETADOS

Depois de terem sido calculadas automaticamente todas as coordenadas dos alvos, torna-se necessário rotular cada um deles, de maneira a definir a correspondência entre os raios do feixe projetado e os pontos na imagem.

Usando-se os valores obtidos na determinação automática dos pontos de apoio inicia-se o processo de rotulação: o arquivo contendo as coordenadas dos pontos projetados é varrido e determina-se os menores e maiores valores das coordenadas em x e y. Com estes valores é determinada uma caixa limitante, que pode ser visualizada na figura 5.

Após a determinação da caixa limitante são rotulados 4 pontos da imagem: os pontos superior esquerdo, superior direito, inferior esquerdo e inferior direito. Esses pontos são rotulados com base na distância entre os alvos e os vértices da caixa limitante.

Figura 5 – Caixa limitante e pontos projetados.

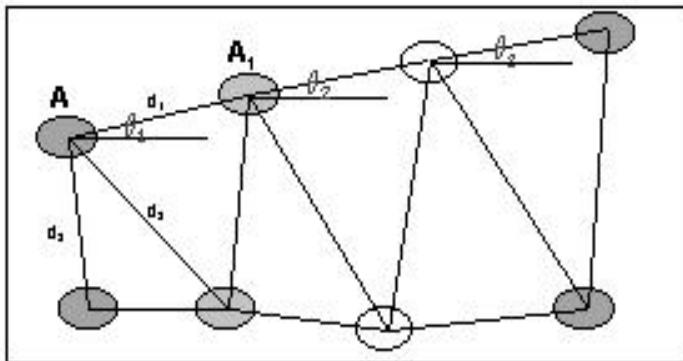


#### 3.1 ROTULAÇÃO POR VIZINHANÇA

Quando os alvos são projetados sobre uma superfície aproximadamente plana, os demais pontos projetados são rotulados com base em critérios de distância e ângulos. Parte-se do primeiro ponto rotulado (A) e busca-se pelo vizinho mais próximo. Para tanto são calculados os ângulos e as distâncias em relação aos vizinhos mais próximos. Ordena-se, então, por distância e ângulo e considera-se como vizinho em y aquele que possuir o ângulo mais próximo de zero (entre aqueles alvos candidatos ordenados pela distância). O ponto rotulado ( $A_1$ ) passa a ser a nova origem de busca e o ângulo  $\theta$  entre A e  $A_1$  é usado como heurística de busca para o próximo ponto. Repete-se o cálculo de ângulos e distâncias entre  $A_1$  e seus vizinhos e escolhe-se o ponto que apresentar o ângulo mais próximo do ângulo anterior e menor distância. Rotula-se este ponto e repete-se recursivamente até o

último ponto ser rotulado. Um esquema do procedimento descrito é mostrado na figura 6.

Figura 6 – Esquema da rotulação de alvos por ângulo e distância.



Na figura 7 é apresentado um esquema da rotulação automática de pontos projetados e a numeração adotada para os pontos da grade projetada. Após serem rotulados, os pontos projetados devem apresentar esta numeração. Inicialmente são rotulados os pontos mais próximos da caixa limitante descrita anteriormente, ou seja, os pontos 0, 20, 420 e 440 da figura. Depois são rotulados os demais elementos da primeira coluna que ainda não foram rotulados, ou seja, os elementos 1 à 19. A primeira coluna é a origem de busca para os demais elementos das outras colunas. Depois são rotulados os demais elementos da primeira linha e última coluna, respectivamente.

Figura 7 - Esquema do procedimento de rotulação automática de pontos projetados.

linhas →		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
c o l u n a s ↓	0	0	21	42	63	84	105	126	147	168	189	210	231	252	273	294	315	336	357	378	399	420
	1	1	22	43	64	85	106	127	148	169	190	211	232	253	274	295	316	337	358	379	400	421
	2	2	23	44	65	86	107	128	149	170	191	212	233	254	275	296	317	338	359	380	401	422
	3	3	24	45	66	87	108	129	150	171	192	213	234	255	276	297	318	339	360	381	402	423
	4	4	25	46	67	88	109	130	151	172	193	214	235	256	277	298	319	340	361	382	403	424
	5	5	26	47	68	89	110	131	152	173	194	215	236	257	278	299	320	341	362	383	404	425
	6	6	27	48	69	90	111	132	153	174	195	216	237	258	279	300	321	342	363	384	405	426
	7	7	28	49	70	91	112	133	154	175	196	217	238	259	280	301	322	343	364	385	406	427
	8	8	29	50	71	92	113	134	155	176	197	218	239	260	281	302	323	344	365	386	407	428
	9	9	30	51	72	93	114	135	156	177	198	219	240	261	282	303	324	345	366	387	408	429
	10	10 <td>31</td> <td>52</td> <td>73</td> <td>94</td> <td>115</td> <td>136</td> <td>157</td> <td>178</td> <td>199</td> <td>220</td> <td>241</td> <td>262</td> <td>283</td> <td>304</td> <td>325</td> <td>346</td> <td>367</td> <td>388</td> <td>409</td> <td>430</td>	31	52	73	94	115	136	157	178	199	220	241	262	283	304	325	346	367	388	409	430
	11	11 <td>32</td> <td>53</td> <td>74</td> <td>95</td> <td>116</td> <td>137</td> <td>158</td> <td>179</td> <td>200</td> <td>221</td> <td>242</td> <td>263</td> <td>284</td> <td>305</td> <td>326</td> <td>347</td> <td>368</td> <td>389</td> <td>410</td> <td>431</td>	32	53	74	95	116	137	158	179	200	221	242	263	284	305	326	347	368	389	410	431
	12	12 <td>33</td> <td>54</td> <td>75</td> <td>96</td> <td>117</td> <td>138</td> <td>159</td> <td>180</td> <td>201</td> <td>222</td> <td>243</td> <td>264</td> <td>285</td> <td>306</td> <td>327</td> <td>348</td> <td>369</td> <td>390</td> <td>411</td> <td>432</td>	33	54	75	96	117	138	159	180	201	222	243	264	285	306	327	348	369	390	411	432
	13	13 <td>34</td> <td>55</td> <td>76</td> <td>97</td> <td>118</td> <td>139</td> <td>160</td> <td>181</td> <td>202</td> <td>223</td> <td>244</td> <td>265</td> <td>286</td> <td>307</td> <td>328</td> <td>349</td> <td>370</td> <td>391</td> <td>412</td> <td>433</td>	34	55	76	97	118	139	160	181	202	223	244	265	286	307	328	349	370	391	412	433
	14	14 <td>35</td> <td>56</td> <td>77</td> <td>98</td> <td>119</td> <td>140</td> <td>161</td> <td>182</td> <td>203</td> <td>224</td> <td>245</td> <td>266</td> <td>287</td> <td>308</td> <td>329</td> <td>350</td> <td>371</td> <td>392</td> <td>413</td> <td>434</td>	35	56	77	98	119	140	161	182	203	224	245	266	287	308	329	350	371	392	413	434
	15	15 <td>36</td> <td>57</td> <td>78</td> <td>99</td> <td>120</td> <td>141</td> <td>162</td> <td>183</td> <td>204</td> <td>225</td> <td>246</td> <td>267</td> <td>288</td> <td>309</td> <td>330</td> <td>351</td> <td>372</td> <td>393</td> <td>414</td> <td>435</td>	36	57	78	99	120	141	162	183	204	225	246	267	288	309	330	351	372	393	414	435
	16	16 <td>37</td> <td>58</td> <td>79</td> <td>100</td> <td>121</td> <td>142</td> <td>163</td> <td>184</td> <td>205</td> <td>226</td> <td>247</td> <td>268</td> <td>289</td> <td>310</td> <td>331</td> <td>352</td> <td>373</td> <td>394</td> <td>415</td> <td>436</td>	37	58	79	100	121	142	163	184	205	226	247	268	289	310	331	352	373	394	415	436
	17	17 <td>38</td> <td>59</td> <td>80</td> <td>101</td> <td>122</td> <td>143</td> <td>164</td> <td>185</td> <td>206</td> <td>227</td> <td>248</td> <td>269</td> <td>290</td> <td>311</td> <td>332</td> <td>353</td> <td>374</td> <td>395</td> <td>416</td> <td>437</td>	38	59	80	101	122	143	164	185	206	227	248	269	290	311	332	353	374	395	416	437
	18	18 <td>39</td> <td>60</td> <td>81</td> <td>102</td> <td>123</td> <td>144</td> <td>165</td> <td>186</td> <td>207</td> <td>228</td> <td>249</td> <td>270</td> <td>291</td> <td>312</td> <td>333</td> <td>354</td> <td>375</td> <td>396</td> <td>417</td> <td>438</td>	39	60	81	102	123	144	165	186	207	228	249	270	291	312	333	354	375	396	417	438
	19	19 <td>40</td> <td>61</td> <td>82</td> <td>103</td> <td>124</td> <td>145</td> <td>166</td> <td>187</td> <td>208</td> <td>229</td> <td>250</td> <td>271</td> <td>292</td> <td>313</td> <td>334</td> <td>355</td> <td>376</td> <td>397</td> <td>418</td> <td>439</td>	40	61	82	103	124	145	166	187	208	229	250	271	292	313	334	355	376	397	418	439
	20	20 <td>41</td> <td>62</td> <td>83</td> <td>104</td> <td>125</td> <td>146</td> <td>167</td> <td>188</td> <td>209</td> <td>230</td> <td>251</td> <td>272</td> <td>293</td> <td>314</td> <td>335</td> <td>356</td> <td>377</td> <td>398</td> <td>419</td> <td>440</td>	41	62	83	104	125	146	167	188	209	230	251	272	293	314	335	356	377	398	419	440

### 3.1 ROTULAÇÃO POR COR

Quando a superfície a ser reconstruída é sinuosa e apresenta descontinuidades, a etapa da rotulação usando apenas o critério de distância e ângulo não é suficiente para resolver o problema. Torna-se necessário usar uma nova metodologia. A solução adotada utiliza padrões projetados coloridos.

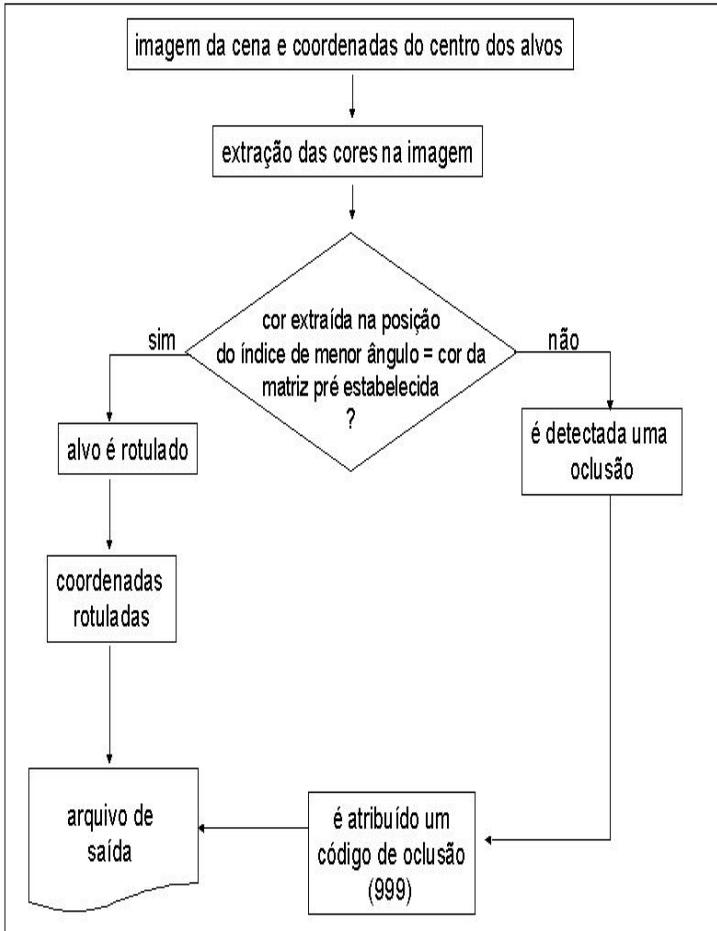
Previamente sabe-se que a matriz de padrões coloridos projetados tem a primeira coluna vermelha, a segunda azul e a terceira branca. Essas cores foram codificadas com os números 1, 2 e 3 respectivamente. As cores se repetem a cada 3 colunas.

Tendo a posição do centro de cada alvo projetado, é analisada a cor na posição central e sua vizinhança 4-conectada, adotando-se o valor médio de cada componente. Adotou-se este critério ao verificar-se, através de testes, que a cor do alvo tem uma melhor definição na região central.

Depois do alvo ter sido localizado por ângulos e distância e ter sua cor extraída, esta cor é comparada com a cor codificada da matriz de cores pré estabelecida. Se o alvo identificado tiver a mesma cor da matriz pré-estabelecida o mesmo é rotulado. Caso contrário será identificada uma oclusão e passa-se para o

próximo alvo. O procedimento continua até que todos os alvos da imagem sejam rotulados. Na figura 8 é mostrado um esquema da rotulação automática de alvos.

Figura 8 - Esquema da rotulação automática de alvos.



#### 4 EXPERIMENTOS E RESULTADOS

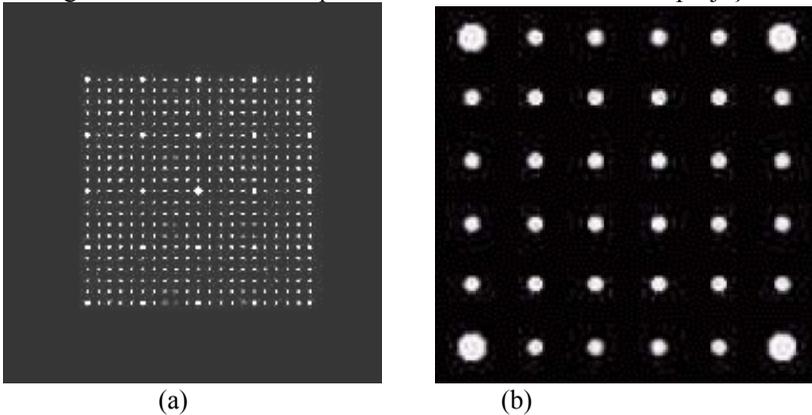
O sistema 3DSCAN foi testado com dados simulados e reais. Foram realizados inúmeros experimentos no decorrer do trabalho, para verificar condições ideais de iluminação, melhor padrão a ser usado na projeção, etc.

Os *slides* usados nos testes de projeção foram desenhados com o *software MicroStation*, exportados para o *software Corel Draw* e impressos em fotolito. O desenho foi plotado em branco e preto em uma folha formato A4 e depois

recortados 20 *slides*, diferenciados por forma e tamanho dos padrões, os quais foram usados nos testes até se chegar a um *slide* que se mostrou o mais adequado. Cada *slide* tem o tamanho de 5x5cm, sendo que os 441 padrões estão distribuídos em 21 linhas e 21 colunas, em uma área de 3x3cm.

Na figura 9 (a) é mostrado um slide monocromático usado nos testes iniciais de projeção e na figura 9 (b) um detalhe do mesmo ampliado, onde pode-se notar que os padrões circulares são diferenciados apenas pelo tamanho.

Figura 9 - *Slide* branco e preto usado nos testes iniciais de projeção.

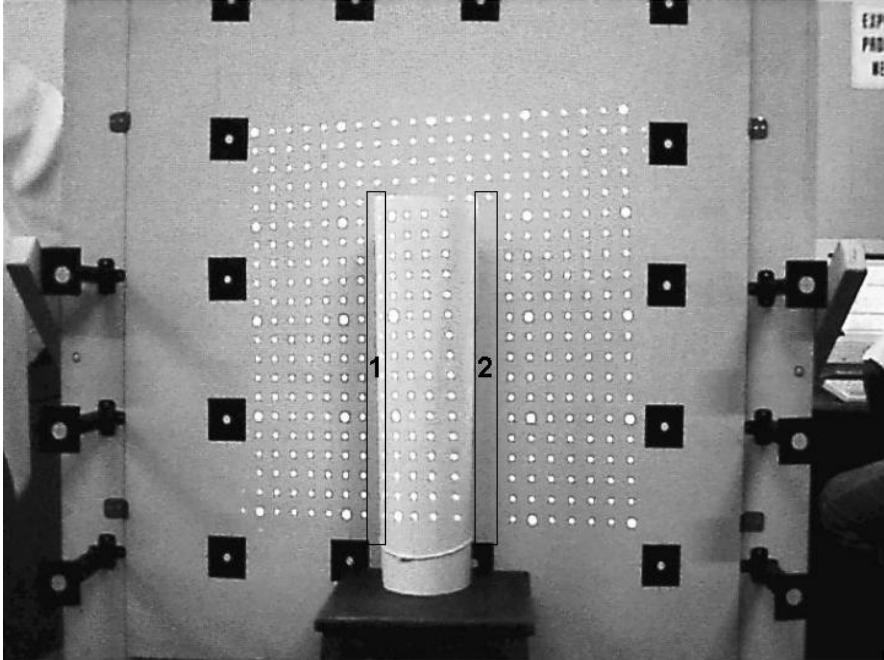


Inicialmente os *slides* monocromáticos atenderam a finalidade do trabalho, ou seja, os pontos projetados luminosos podiam ser reconhecidos e rotulados ao serem projetados sobre superfícies planas. No decorrer do trabalho, notou-se que alguns pontos desapareciam na imagem capturada ao se trabalhar com superfícies mais sinuosas. Este problema é referido aqui como oclusão.

A figura 10 apresenta uma superfície iluminada por padrões luminosos brancos, podendo-se notar que no retângulo 2 os pontos sofreram um deslocamento e no retângulo 1 os pontos sofreram oclusão.

Para resolver o problema da rotulação dos pontos projetados em imagens que apresentam oclusão optou-se por trabalhar com padrões coloridos. Os padrões foram pintados manualmente com canetas de retroprojetor. Foram realizados inúmeros testes com diferentes combinações de cores para verificar quais seriam as mais adequadas para o propósito. Nos testes realizados notou-se um problema com o sistema de interpolação de cores da câmara digital, quando são usados padrões verdes e azuis. Por esta razão é evitado o uso simultâneo das cores verde e azul em um mesmo experimento. Foram testados *slides* com as cores vermelho, verde e branco. Após inúmeros testes verificou-se que a cor verde ao ser projetada não conseguia um grande contraste, sendo confundida com o fundo da imagem.

Figura 10 – Superfície a ser reconstruída e regiões de descontinuidade.



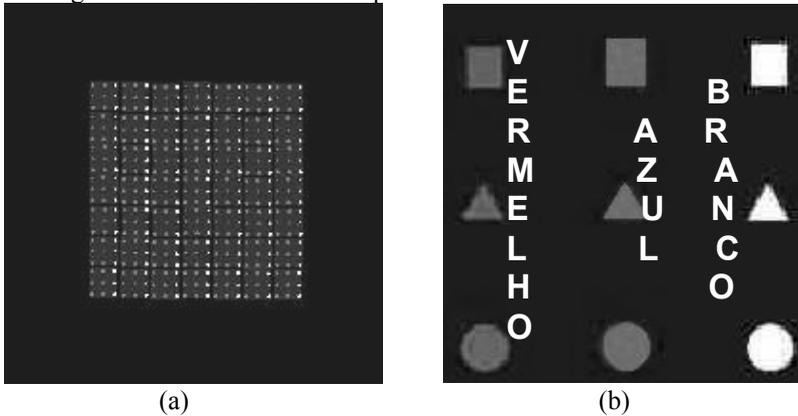
Na figura 11 (a) é mostrado um *slide* diferenciado por forma e cor. São 441 alvos, distribuídos em 21 linhas e 21 colunas. A primeira linha é constituída por quadrados, a segunda por triângulos e a terceira por círculos. Os padrões se repetem até a vigésima primeira linha. A primeira coluna tem a cor vermelha, a segunda a cor verde e a terceira a cor branca. As cores se repetem até a vigésima primeira coluna. Na figura 11(b) é mostrado um detalhe ampliado deste padrão.

Finalmente, verificou-se que a combinação de cores mais adequada é a da figura 11, ou seja, vermelho, azul e branco, que foi adotada nos testes finais deste trabalho. O reconhecimento por formas foi descartado, pois não foram obtidos resultados satisfatórios, devido a resolução da câmara digital utilizada.

## 5 RESULTADOS DA LOCALIZAÇÃO E ROTULAÇÃO AUTOMÁTICA DE PONTOS PROJETADOS

Ao se executar a rotina de localização automática de pontos projetados é gerado um arquivo de saída, com o número do ponto, as coordenadas do centro do ponto projetado ( $x$ ,  $y$ ) no referencial da imagem e o número de pixels que o alvo possui. Este arquivo representa as coordenadas antes da rotulação, não sendo possível saber a correspondência entre os mesmos e os pontos da grade projetada.

Figura 11 - *Slide* usado nos experimentos descritos neste trabalho.



A rotulação é realizada extraíndo-se as cores dos pontos projetados na imagem, obtendo-se um arquivo com os dados da rotulação. Quando é encontrada uma oclusão, o ponto projetado recebe uma codificação, no caso, 999, não sendo possível sua visualização na imagem.

Na sequência é gerado um arquivo com as coordenadas rotuladas, que serão usadas no processo de reconstrução.

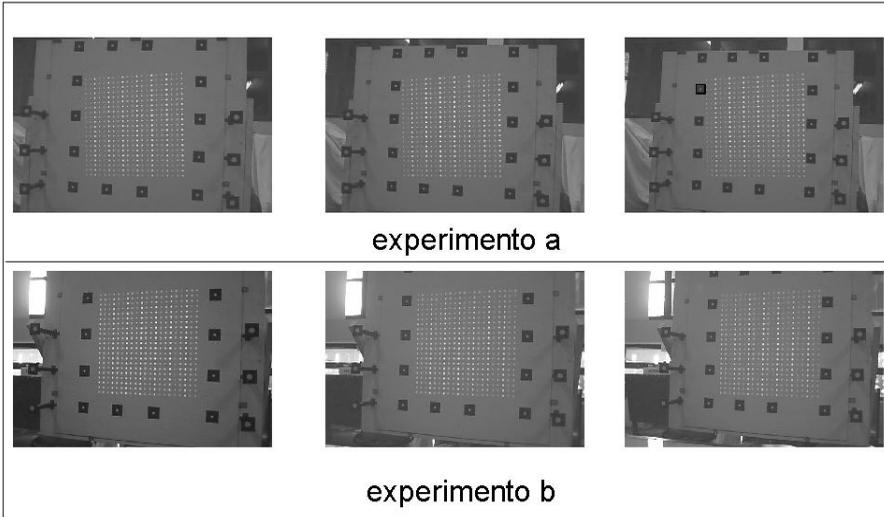
Para a calibração do feixe projetado foi usado como anteparo uma placa de projeção com 16 pontos de apoio, os quais tiveram suas coordenadas X, Y e Z medidas no espaço objeto. O sistema 3DSCAN foi colocado sobre a base móvel de um coordenatógrafo, para que o sistema tivesse movimentos controlados em uma direção.

Em cada experimento foram tomadas 3 imagens, com espaçamento de 100mm entre os planos de projeção. A placa de calibração foi colocada a aproximadamente 1900mm do sistema no experimento (a) e a 1800mm do sistema no experimento (b). O sistema foi movido de 100mm na direção de afastamento da placa de calibração e tomada a segunda imagem. Novamente o sistema foi movido de 100mm na mesma direção e tomada a terceira imagem. Por último foi colocada uma superfície a ser reconstruída e tomada a última imagem. No primeiro experimento (a) foi tomada a imagem de um pequeno tubo e no experimento (b) de uma caixa. A figura 12 mostra as três imagens tomadas para a calibração do sistema, nos experimentos (a) e (b).

Para a reconstrução do objeto, todos os pontos projetados, nas 4 imagens capturadas, foram medidos e rotulados automaticamente com o programa para reconstrução de superfícies "rscd" desenvolvido em C++Builder. Foram determinados automaticamente mais de 1700 pontos, ou seja mais de 3500 coordenadas em cada experimento, o que justifica a proposta deste trabalho, pois uma medição manual, ou mesmo semi-automática destes pontos seria impraticável.

As coordenadas dos pontos de apoio no espaço imagem foram medidas semi-automaticamente, pois são apenas 16 pontos em cada imagem.

Figura 12 - Imagens capturadas para a calibração do projetor (experimentos a e b).



Para a calibração do projetor e determinação dos cossenos diretores das retas emergentes do projetor foi utilizado o programa *Caliscan* desenvolvido em Tommaselli (1998). A seguir, são apresentados alguns resultados da calibração.

Os valores encontrados para a calibração do projetor encontram-se em Scalco e Tommaselli (2000).

No processo de calibração do projetor, são obtidas as coordenadas dos pontos projetados no referencial global, partindo-se do princípio de que a coordenada Z do plano é conhecida. Para transformar as coordenadas do projetor para o referencial da câmara, aplica-se a transformação de similaridade inversa, usando-se os parâmetros de orientação exterior da câmara no primeiro plano. Depois são obtidas as coordenadas dos vetores diretores para as 441 retas projetantes em cada experimento. A partir das coordenadas do centro perspectivo do projetor, dos cossenos diretores das retas projetantes e das coordenadas imagem de um ponto projetado em uma superfície, é possível determinar as coordenadas X,Y,Z no referencial global, deste ponto. Para avaliar a dispersão dos pontos reconstruídos em relação ao plano de orientação foi calculada uma transformação de similaridade entre o conjunto de coordenadas obtidas pela resseção espacial. Na tabela 1 é apresentado o E.M.Q. dos erros na reconstrução do plano, nos dois experimentos, a e b, respectivamente. Verifica-se em ambos os experimentos, que as coordenadas X e Y são recuperadas com uma exatidão na ordem de 0.3 mm e as coordenadas Z

com uma exatidão da ordem de 1.5 mm, o que já era esperado, pois um erro maior na coordenada Z é aceitável, considerando-se as condições do experimento.

TABELA 1  
Erro médio quadrático nos pontos após a transformação de similaridade

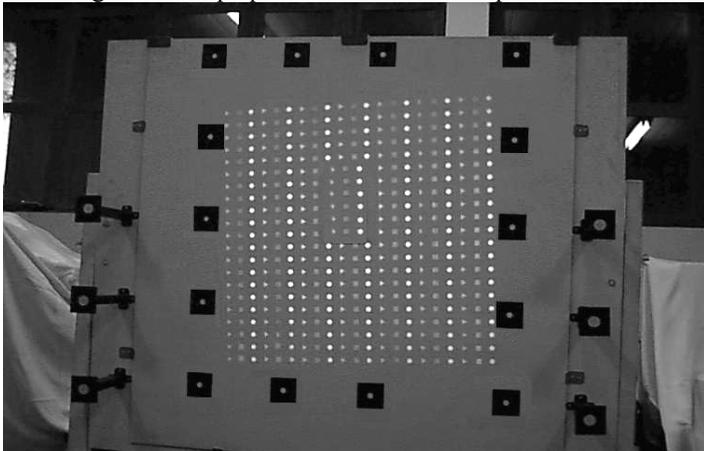
$EMQ_x$	$EMQ_y$	$EMQ_z$
Experimento a		
0.2660	0.1535	1.4582
Experimento b		
0.3244	0.2207	1.5248

Tendo os valores dos cossenos diretores e os parâmetros de calibração da câmara e projetor, é possível obter as coordenadas tridimensionais do objeto imageado.

De posse do modelo numérico do objeto, que contém as coordenadas tridimensionais (X,Y,Z) de um conjunto de pontos, torna-se possível representar graficamente a superfície em qualquer programa que importe um arquivo de coordenadas. O programa usado para esta representação foi o *Surfer* da *Golden Software*.

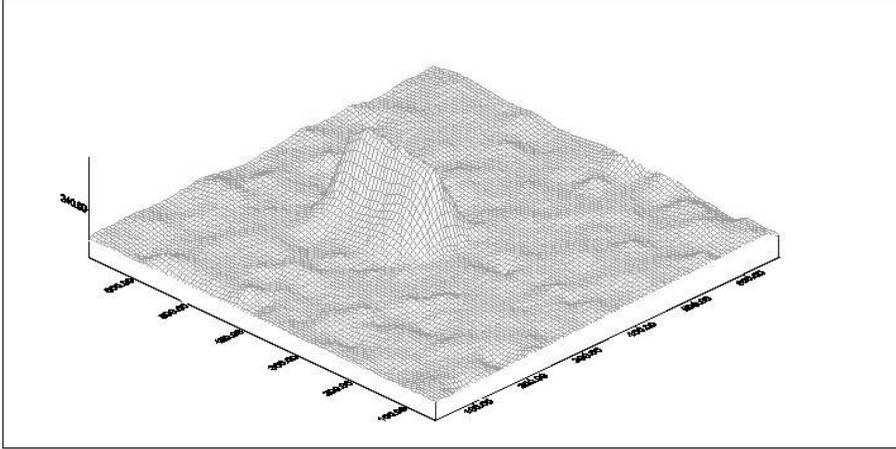
Na figura 13 é apresentada uma das imagens capturadas com o sistema 3DSCAN, um pequeno tubo, e nas figuras 14, 15, e 16 representações gráficas obtidas com os dados do modelo numérico do objeto gerado com a metodologia descrita neste trabalho.

Figura 13 - Imagem de um pequeno tubo usada no experimento de reconstrução.



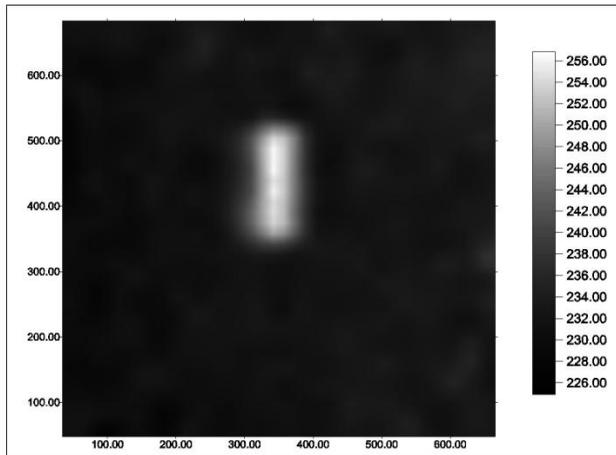
Na figura 14 é mostrado o modelo digital do pequeno tubo. Sua representação foi correta, apesar de terem sido projetados apenas 18 pontos sobre a superfície.

Figura 14 - Representação tridimensional do modelo numérico do pequeno tubo.



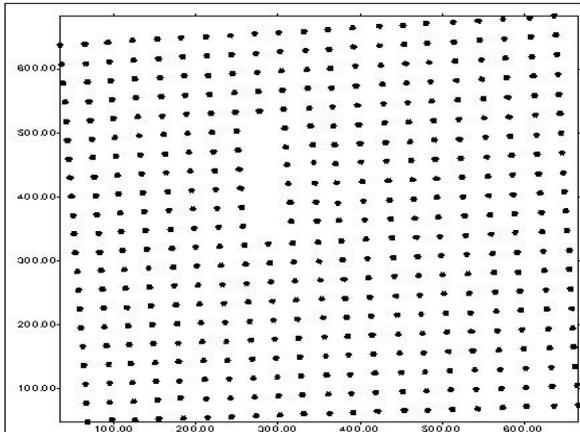
Na figura 15 é mostrada uma outra forma de representação gráfica, onde os pontos da imagem mais claros indicam uma maior elevação, e os pontos mais escuros indicam uma menor elevação. A diferença entre o ponto mais alto e o mais baixo na imagem é de 30 mm, o que corresponde à superfície capturada.

Figura 15 - Representação gráfica do pequeno tubo.



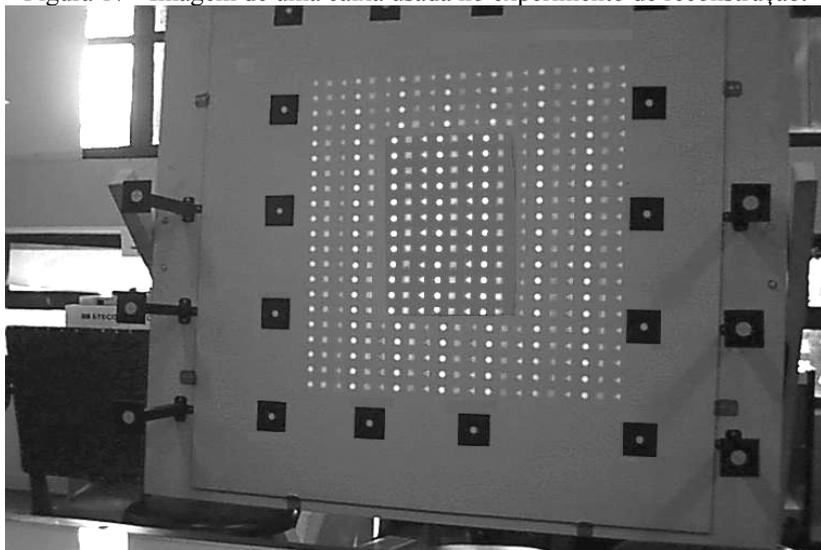
Na figura 16 são plotadas as coordenadas bidimensionais obtidas, onde é possível notar os pontos que não aparecem na imagem (problema de oclusão).

Figura 16 - Representação dos pontos da grade projetada sobre o pequeno tubo.



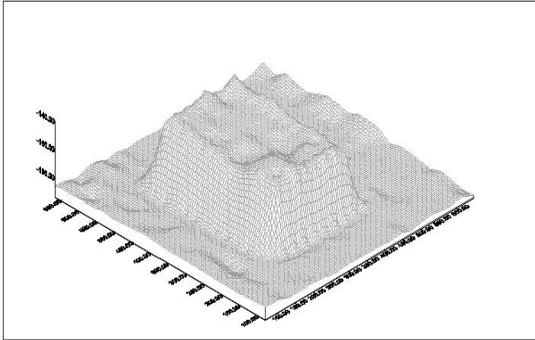
Na figura 17 é apresentada a imagem de outra superfície capturada com o sistema 3DSCAN para ser reconstruída, uma pequena caixa de papelão. Nas figuras 18, 19 e 20 são apresentadas visualizações gráficas desta superfície.

Figura 17 - Imagem de uma caixa usada no experimento de reconstrução.



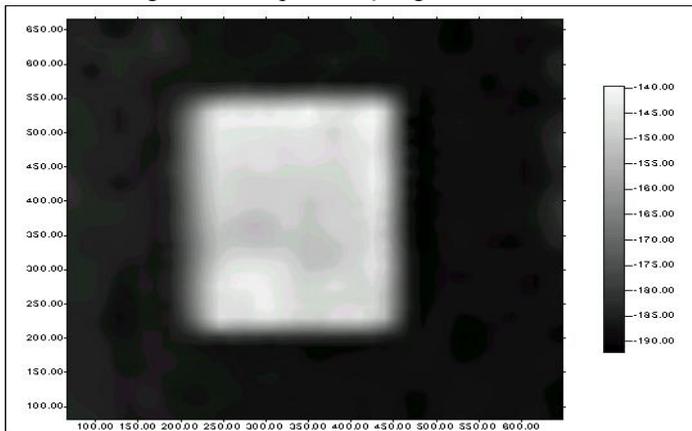
Na figura 18 é mostrado o modelo digital da caixa. Sua representação foi correta, e melhor do que a representação do pequeno tubo, em virtude da superfície ter uma maior dimensão e um número maior de pontos projetados sobre a mesma.

Figura 18 - Representação tridimensional do modelo numérico da caixa.



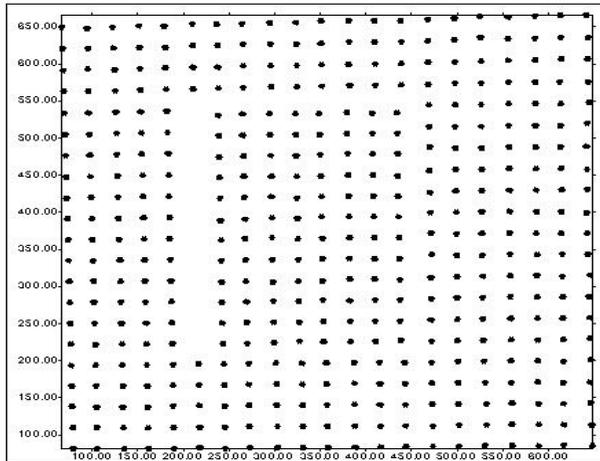
Na figura 19 é apresentada a representação gráfica da caixa, em forma de imagem. A diferença entre o ponto mais alto e o mais baixo na imagem é de 50 mm, o que corresponde à superfície capturada. As variações apresentadas na superfície (que deveria ter uma face plana) são devidas aos erros de reconstrução.

Figura 19 - Representação gráfica da caixa.



Na figura 20 são plotadas as coordenadas bidimensionais obtidas, onde é possível notar os pontos oclusos.

Figura 20 - Representação dos pontos da grade projetada sobre a caixa.



## 6 CONCLUSÕES

O presente trabalho mostrou o procedimento usado para calcular e rotular automaticamente as coordenadas do centro de pontos projetados usados em reconstrução de superfícies à curta distância com o método de reconstrução com luz estruturada. Isto permite a determinação automática de correspondência entre os padrões da grade projetada de pontos e padrões projetados na imagem. Os experimentos foram realizados com sucesso. Dois objetos foram reconstruídos com precisão, o que indica o sucesso da abordagem proposta. O método pode ser aplicado a objetos simples, sem muita sinuosidade, como por exemplo em peças arqueológicas e objetos industriais.

Um dos parâmetros críticos para o sucesso da rotulação automática de pontos utilizando alvos coloridos é a captura da imagem, na qual deve ser tomado extremo cuidado com a iluminação controlada, para garantir que os alvos sejam registrados na imagem.

Uma melhoria que deve ser realizada é a construção de um novo *slide* a ser projetado.

Deve-se estudar o uso de outras formas de rotulação, como formas ou padrões codificados.

Recomenda-se, ainda, utilizar câmaras com maior resolução, o que garantiria melhor definição dos alvos projetados.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- DUNN, S.M.; KEIZER, R.L.; YU, J. Measuring the Area and Volume of the Human Body with Structured Light. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. V. 19, n.6, p.350-1364, 1989.
- GUISSER, L.; PAYRISSANT, R.; CASTAN, S. A New Surface Measurement System Using a Structured Light. Université Paul Sabatier, Toulouse, France, 1992.
- MAAS, H.G. Robust Automatic Surface Reconstruction with Structured Light. In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. Proceedings. p.709-713. Washington, 1992.
- PLASSMANN, P.; JONES, B. F.; RING, E. F. J. A Structured Light System for Measuring Wounds. Fotogrametric Record. p.197-204, 1995
- SCALCO, P.A.P.; TOMMASELLI, A.M.G. Determinação Automática de Correspondência em um Sistema de Reconstrução com Luz Estruturada. Dissertação de Mestrado apresentada ao Departamento de Cartografia, como requisito parcial para o obtenção do título de mestre em Ciências Cartográficas. Unesp, Presidente Prudente, 2000.
- SCALCO, P.A.P.; TOMMASELLI, A.M.G. Implementação de Algoritmos para Reconstrução de Imagens. Relatório de Especialização / Aperfeiçoamento / Pesquisa (CNPq). Departamento de Cartografia. Unesp, Presidente Prudente, 1997.
- SINGH, R.; CHAPMAN, D.P.; ATKINSON, K.B. Digital Photogrammetry for automatic measurement of textureless and featureless objects. Photogrammetric Record, v.15, n.89, p.691-702, 1997.
- TOMMASELLI, A.M.G. Caracterização Geométrica de um Sistema Fotogramétrico Digital para Reconstrução de Imagens de Superfícies à Curta Distância. Tese apresentada ao Departamento de Cartografia, como requisito parcial para o obtenção do título de Livre\_Docente. Unesp, Presidente Prudente, 1998.
- Zanini, M. Oberflächenbestimmung mit strukturiertem Licht. Diplomarbeit, Abteilung Kulturtechnik und Vermessung. Zürich, 1991.

(Recebido em 27/11/01. Aceito para publicação em 04/02/02.)